

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

粒子群優化演算法應用於感測器最佳化

配置問題

Application of Particle Swarm Optimization in

Optimal Sensor Placement

研究生：李奇霖

指導教授：洪士林 博士

中華民國 一〇二年七月

粒子群優化演算法應用於感測器最佳化配置問題
**Application of Particle Swarm Optimization in Optimal
Sensor Placement**

研究生：李奇霖

Student : Chi-Lin Lee

指導教授：洪士林

Advisor : Dr. Shih-Lin Hung

國立交通大學

土木工程系

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in 1896

Civil Engineering

July 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇二年七月

粒子群優化演算法應用於感測器最佳化配置問題

研究生：李奇霖

指導教授：洪士林 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

摘要

結構物因材料老化或受外力作用而造成損壞。所以持續監測結構物的健康狀況是有其必要性，也是近來土木結構工程領域重要的研究議題之一。而感測器系統為結構健康監測系統之關鍵設備。故如何有效的規劃與佈設感測器亦成為結構健康監測系統關鍵探討議題。如何使用有限的感測器便能得知所欲量測的結構行為，此類問題延伸出感測器最佳化配置問題。在眾多仿生演算法中，粒子群優化演算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 是一個收斂快速的最佳化演算法。本研究之目的即以 PSO 演算法探討加速度型感測器於結構安全監測系統之最佳化配置問題。研究將探討在固定數量下，如何選定最佳的感測器佈設位置。研究將利用 FIM (Fisher information matrix) 當作粒子群優化演算法的感測器位置適合度指標。為增進 PSO 演算法之搜尋效能，本研究發展出三種改良式搜尋策略來增加粒子群優化演算法的搜尋能力。研究中藉由四個案例來驗證改良式 PSO 之效能。研究結果顯示，PSO 演算法可求得感測器之最佳佈設位置，且適合度指標均分別達 18.494、 2.1587×10^6 、 6.3635×10^5 與 2.1587×10^6 。

關鍵字：結構健康監測系統、感測器最佳化配置問題、粒子群優化演算法、感測器位置適合度指標 FIM (Fisher information matrix)

Application of Particle Swarm Optimization in Optimal Sensor Placement

Student : Chi-Lin Lee

Advisor : Dr. Shih-Lin Hung

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

Structures may be damaged due to ageing of material or by external force. Continued monitoring of structures of health is a necessity and is recently one of the important research topics in the field of structural engineering. Sensor system for structural health monitoring (SHM) system is significant equipment. Hence, how to effectively plan and arrangement of sensors has become the key research topic in SHM. Meanwhile, how to use limited and want sensors to measure structural behavior is an optimal sensor configuration issues. In numerous bionic algorithms, particle swarm optimization (PSO) algorithm is a fast convergence algorithm for solving optimization problems. The objective of the present study is based on PSO algorithm to optimal placement of acceleration sensors for structural health monitoring system. Under a fixed number of sensors, the study will explore how to select the best sensor location emplacement. The FIM (Fisher information matrix) is employed as a fitness index for PSO algorithm for optimal locating sensors. For improving PSO algorithm, three strategies for improving search were developed. Four case studies were utilized to verify the effectiveness of modified PSO. Simulation results reveal that PSO algorithm can effectively seek out the optimal location emplacement of sensors.

Keywords: structural health monitoring (SHM), optimal sensor configuration, particle swarm optimization (PSO) algorithm, FIM (Fisher information matrix)

誌謝

在研究的歷程中，最要感謝的是我的指導教授洪士林老師，這二年來的指導和教誨，在我研究出現瓶頸和迷惘時為我指點迷津，在口試前指導簡報的製作與報告的技巧，使我在口試時更加順利。再來感謝黃炯憲老師、林昌佑老師和詹君治學長於課餘時間撥冗參加學生的口試，並給予許多寶貴的意見，使我的論文更加完整，在此也謝謝老師們的指導。

感謝詹君治學長這二年來，不論是在簡報製作、專業知識和口頭報告上都給予許多的指導。使我的研究能在碰到問題時，找出解決辦法。感謝穎泰學長、思伶學姐、孟軒學長、宣治學長、晟佑學長、俊佐學長、勇奇學長在課業和論文方面給予的協助和建議，使我在面臨困難之時，提供意見與鼓勵。

感謝研究所同窗好友子陽、銘澤、錦鴻、義洋、耀緯、明廉、冠龍、湘銘、人傑、孟翰、育誠和瀚喻，在生活、課業、程式、研究、論文方面給予的協助。感謝學弟君廷、智嵩、建文和允璿也在我需要幫忙時，提供相關資訊供我參考。

感謝大學時期的同學與學弟，在研究之餘，在網路上或是球類運動上的交流，使研究煩悶時有個出口宣洩。

最後，將本論文獻給我的父母，因為你們的教導、奉獻、鼓勵

與支持，給與我最大的動力，使得我能專心致力於我的研究上，並且順利的畢業，一個人一路走來受到許多人的幫助，才能走到這裡，因為當時的幫助造就了現在的我，在這鄭重的感謝所有曾經幫助我的人。

李奇霖 謹誌

中華民國 102 年 7 月于國立交通大學

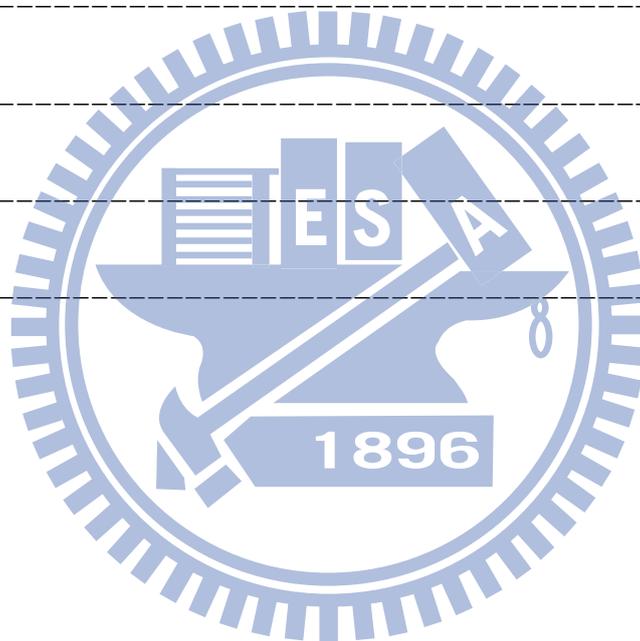


目錄

摘要	I
Abstract	II
誌謝	III
目錄	V
表目錄	VIII
圖目錄	IX
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究動機	2
1.3 研究目的	3
1.4 研究步驟	4
1.5 論文架構	4
第二章 文獻回顧	6
2.1 結構健康監測	6
2.2 感測器最佳化配置	7
2.3 感測器位置適合度之指標	9
2.3.1 模態確認指標(MAC)	9
2.3.2 奇異值分解係數(SVDR)	10

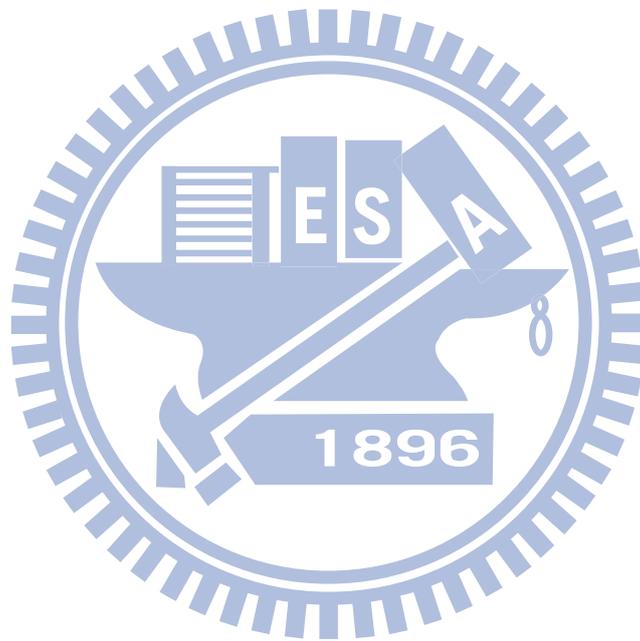
2.3.3 費雪訊息矩陣 (FIM)	-----	10
2.4 感測器配置方法比較	-----	11
2.5 EFI (effective independence method) 感測器配置方法	-----	12
2.6 粒子群優化演算法	-----	14
2.6.2 加速因子	-----	16
2.6.2 慣性權重 ω	-----	16
第三章 研究方法	-----	18
3.1 粒子群優化演算法	-----	18
3.2 目標函數 FIM	-----	18
3.2 建立模型	-----	21
3.4 粒子群優化演算法應用於感測器最佳化配置問題之搜尋策略	-----	23
第四章 結果分析與探討	-----	27
4.1 模型一：懸臂梁	-----	27
4.2 模型二：2D 橋面板	-----	28
4.2.1 策略一：移民	-----	28
4.2.2 策略二：分區	-----	29
4.2.3 策略三：分取	-----	30

4.2.4 模型二各種策略比較	-----	30
4.2.5 隨機分區與規律分區之比較	-----	31
4.3 模型三：箱型橋	-----	31
4.4 模型四：限制感測器放置位置	-----	32
第五章 結論與建議	-----	33
5.1 結論	-----	33
5.2 建議	-----	35
參考文獻	-----	36
附表	-----	39
附圖	-----	41



表目錄

表 4-1	模型一之感測器最佳化配置-----	39
表 4-2	模型二之感測器最佳化之位置-----	39
表 4-3	模型三之感測器最佳化之位置-----	40



圖目錄

圖 2-1 粒子群優化演算法其速度和位置更新示意圖-----	41
圖 2-2 傳統粒子群優化演算法流程圖-----	42
圖 3-1 加入移民策略之流程圖-----	43
圖 3-2 規律分區策略示意圖-----	44
圖 3-3 節點編號使用代號表示之示意圖-----	45
圖 3-4 加入分區策略之流程圖-----	46
圖 3-5 加入分取策略之流程圖-----	47
圖 3-6 隨機分區策略示意圖-----	48
圖 3-7 模型一：懸臂梁-----	49
圖 3-8 模型二：兩端為固定端之橋面板-----	50
圖 3-9 模型三：側視圖-1-----	51
圖 3-10 模型三：俯視圖（橋面）-----	51
圖 3-11 模型三：仰視圖（箱型底）-----	52
圖 3-12 模型三：側視圖-2-----	52
圖 3-13 模型四限制感測器放置位置之橋面板-----	54
圖 4-1 模型一之感測器配置位置-----	55
圖 4-2 搜尋模型一時之目標函數與迭代次數關係圖-----	55
圖 4-3 增加計算次數分析模型二之目標函數與迭代次數關係圖---	56

圖 4-4 加入移民策略之目標函數與迭代次數關係圖-----	56
圖 4-5 藉分析模型二證明移民策略效益圖-----	57
圖 4-6 藉分析模型二證明分區策略效益圖-----	58
圖 4-7 不同變數執行平方和最小值問題之準確度比較圖-----	59
圖 4-8 各種策略組合的目標函數值之平均值與標準差之比較圖--	60
圖 4-9 加入搜尋策略之粒子群優化演算法與 EFI 感測器配置方法之 比較-----	61
圖 4-10 不同的分區類型分析模型二(橋面板)之比較圖-----	62
圖 4-11 橋面板之感測器最佳化配置點位之一-----	63
圖 4-12 橋面板之感測器最佳化配置點位之二-----	64
圖 4-13 橋面板之感測器最佳化配置點位之三-----	65
圖 4-14 橋面板之感測器最佳化配置點位之四-----	66
圖 4-15 3D 橋面板之感測器最佳化配置點位-----	67
圖 4-16 加入搜尋策略後粒子群優化演算法分析於模型三並與 EFI 感 測器配置方法比較-----	68
圖 4-17 模型四之感測器配置位置-----	69
圖 4-18 模型四之目標函數值之平均值與標準差-----	70

第一章 緒論

1.1 研究背景

台灣位於歐亞板塊和菲律賓海板塊之反衝地帶，山多平原少，河川多且湍急。因此為了因應台灣人口密集的情況下，建設了許多房屋和橋樑提供人民居住和移動等的機能。而這些結構物在生命週期中難免會受到地震、颱風、洪水、腐蝕等自然因素[1-3]，或是施工不良等人為因素，影響其結構的安全性。為了預防結構物損壞造成經濟損失或危及生命安全，故需要使用有效的監測系統，隨時評估結構物的損壞情況。

結構健康監測（Structural Health Monitoring，簡稱 SHM）是一種檢測結構損壞的監測概念。通常結構健康監測依監測範圍，可以分為全域健康監測與局部健康監測。其普遍的策略為先利用全域結構健康監測方法來判斷結構物是否有損害，接著再利用局部健康監測的方法來進行進一步的評估其損害的位置及損害程度。

不同的結構健康監測方法分別針對不同的問題來處理，然而藉由單一的方法並無法正確且可靠地判斷結構的健康狀態。因此建立一個整合性的結構健康監測系統，結合全域、局部結構健康監測的方法來監測結構的健康狀態是目前的研究方向之一。

通常結構健康監測系統包含三個主要的部分：感測器系統、數據處理系統和健康評估系統[4]，其中數據處理系統包含數據取得、傳輸和存取。一般結構物感測器放置越多會獲得越詳細的結構資訊，而監測技術的進步，使結構健康監測系統大量的使用感測器，但因感測器需要開發、購買和維持其機能等因素使得經濟成本提高，而有些結構物甚至會因為本身設計的關係，限制感測器的放置，所以許多大型結構物必須透過計算來分析某些特定位置是否應該放置感測器。這類的案件中，在能提供足夠資訊來辨認結構反應的情況下，如何從可放置感測器的位置中，挑選出最少量的感測器位置，成為一個很重要的課題。

1.2 研究動機

此課題延伸出來的感測器最佳化配置（optimal sensor placement (OSP)）的問題，其中含蓋監測、結構動力、資訊科技、最佳化理論等的專業知識。而感測器最佳化配置問題又可分成智慧辨識、演算法的選用、不同指標選用、不確定性、靈敏度等的問題。

當一個問題存在許多限制條件，而在符合這些限制條件下尋找出最佳答案，這個過程稱為最佳化。最佳化演算法通常分為數學演算法和仿生演算法，在早期最佳化方法大多使用梯度法，藉由梯度的計算

來求解問題的極值，但初始點位的選擇將會影響搜尋的效果，較佳的初始點，可以有效率地尋找到全域最佳解；反之，則可能會掉入到局部最佳解。梯度法只能透過計算一個點，藉由梯度進而求出下一個點。而之後經許多學者的研究，發展出能不須藉著計算梯度，即可尋找到最佳解的仿生演算法，其搜尋能力也比傳統的梯度法良好，可以一次搜尋多個點，增加其搜尋效率，如：基因演算法，螞蟻演算法，粒子群優化演算法，擬退火演算法等。

粒子群優化演算法是 Eberhart 和 Kennedy 於 1995 年發表的演算法[5]，與其它演算法比較，其優點在於收斂速度飛快，計算方法簡單，參數設定較少，且粒子群優化演算法具有分散搜尋、記憶與易和其它演算法結合等的特性，適合解決組合最佳化問題的。

1.3 研究目的

感測器最佳化配置的主要目的在於降低施工與材料成本，或是解決特殊情況下感測器的配置問題，而本研究決定使用較為新穎的粒子群優化演算法，有效率地搜尋出在固定感測器數目的條件下，感測器最佳配置的位置，其搜尋結構為利用 sap2000 所建立之四種模型，其模型分別為一維至三維與加入感測器放置位置的限制。

1.4 研究步驟

本研究過程的過程包含下列七個主要步驟：

1. 搜尋相關論文與文獻。
2. 找尋目前較佳的感測器最佳化配置方法，並利用 matlab 編寫
3. 挑選合適的指標(目標函數，Objective Function)。
4. 使用 matlab 編寫粒子群優化演算法程式找尋最佳感測器配置位置。
5. 使用 SAP2000 套裝軟體建置欲分析模型。
6. 提出三種搜尋策略為改進粒子群優化演算法搜尋的精確度。
7. 將步驟 2 之方法所得到的感測器放置位置與粒子群優化演算法搜尋後的結果做比較。

1.5 論文架構

本論文共分為五章，各章節的主要內容如下：

第一章為緒論，陳述本研究之背景、動機、目的及研究步驟。第二章為文獻回顧，首先介紹結構健康監測系統，並衍生到感測器最佳化配置問題，與解決其問題所需的指標與粒子群優化演算法之介紹。第三章為研究方法，介紹本研究所使用的指標、模型、演算法與搜尋策略。第四章為結果與討論，運用第三章之方法分析探討感測器最佳化配置，

並證明本研究所提出的搜尋策略確實有其效用。第五章為結論與建議，包括本研究所得到的結論，並對此研究主題的未來發展方向提出建議。



第二章 文獻回顧

2.1 結構健康監測

結構健康監測 (Structural Health Monitoring, 簡稱 SHM), 是一種檢測結構損壞的監測概念, 通常結構健康監測依監測範圍, 可以分為全域健康監測與局部健康監測。一般全域健康監測法, 主要是依據解析結構震動反應所得到的物理性質, 如: 結構模態向量、頻率, 以及阻尼, 判斷結構模態特性是否改變, 進而推判目前結構物的健康狀態, 並從中分析出結構損壞的位置。早期的方法是以針對結構共振頻率的改變為主, 然而有些損害的構件, 其損壞並不會表現在基礎模態下, 此時以結構共振頻率的改變難以診斷出結構是否損害。而針對在模態振形方面, 損壞對於結構其實是一個局部的現象, 模態振形在局部結構的破壞來說也較不敏感。因此有學者提出以振形曲率來偵測結構的破壞位置, 研究結果顯示振型曲率對於結構構件的勁度損失較為敏感。再者, 近年來常見的方法還有模型更新法、類神經網路、貝式統計方法等。當監測方法為了需要擷取結構振動反應資訊, 而使用傳統有線的感測器系統; 但近年來由於無線感測器網路的興起, 而取代有線感測器, 並已經成為另一個研究重點。

局部健康監測方法主要以非破壞檢測為主, 例如以超音波量測應

力的狀態，渦電流決定裂縫的位置。近年來常用的還有聲發射法、Lamb Wave 法、壓電阻抗法等。然而大部份的局部健康診斷方法都相當費時且昂貴。除了上述兩種方法外，近年來視覺化影像處理技術也常被用來當作診斷結構健康狀況的工具。

一般結構健康監測系統要設想到[6]：

1. 驗證結構設計參數和假設，改進今後相似結構的設計規範和準則。
2. 能偵測到結構有異常的反應、負載和可能的損壞，來確保安全。
3. 在災害發生後，立即提供安全評估所需的即時資訊。
4. 提供資訊並決定要採用何種策略來達到結構安全的目的。
5. 監控並評估實施改善策略後的效果。
6. 使用新的技術或材料，並依據在結構工程中所取得的數據，來得知此技術或材料之效能。

2.2 感測器最佳化配置

感測器最佳化配置問題是一種組合優化的問題，假設當有 n 個位置可供挑選，其中只能擺放 m 個感測器，因此有可能的排列組合將會有 C_m^n 種。

$$C_m^n = \frac{n!}{m!(n-m)!}$$

如果一個結構是簡單的幾何形狀或自由度不多的情況下，也許還能利用試誤法解決最佳化配置問題。但是對於大型結構物，可能包含著上千或上萬個自由度，要詳盡的搜索出答案是非常耗時的，因此需要一個有系統且有效率的方法來解決這類的問題。

感測器配置問題大致可分為三個部分[7]：

1. 需放置多少個感測器在結構物上，即能成功地做動態分析？
2. 感測器應該放置在何處？
3. 如何評估各種不同放置方法的優劣？

有關第一個部分目前的研究已經獲得些許的答案，即感測器數絕對不能低於已知模態振形的數量。為了要觀察其模態振形，實際使用的感測器數量都會大於最小感測器數[8]。第二個部分則為目前廣受重視的研究重點，此類研究主要探討在限制住感測器數目的情況下，找尋出最良好的最佳化方法來解決感測器配置問題。這些方法有些需要依靠計算、迭代或最佳化所需的目標函數來解決此問題。第二部份的研究成果如何，需要藉著解決第三部分的問題加以釐清，兩部分有著相當密切的關係，而當二、三部分的問題都已經解決後，就能在不考慮經濟的限制條件下，確定需要被放置的感測器數目。

2.3 感測器位置適合度之指標

指標又稱為目標函數，一個感測器配置方法的好壞，除了依靠其演算法的搜尋能力外，還需要藉著一個指標來分辨感測器配置的優劣情況。然而，除了一般的動能、應變能，以及模態均方差等較常見的指標外，本章節中所提及的指標較為特殊，這些指標均是依據過去的實驗或從感測器配置理論的研究所獲得的成果。

2.3.1 模態確認指標(MAC)

模態確認指標是一個判斷其假設的模態是否與真實模態接近的指標，為了辨認假設的模態，必須透過模態向量線性相依與否的特性來判定，而依據此特性也能測試建置的有限元素模型是否正確。Carne 和 Dohmann [9] 認為模態確認指標能表現出兩個模態陣形向量的關係。

$$MAC_{ij} = \frac{(\Phi_i^T \Phi_j)^2}{(\Phi_i^T \Phi_i)(\Phi_j^T \Phi_j)}$$

Φ_i 與 Φ_j ：分別表示第 i 和第 j 在在 Φ 矩陣中的行向量

T ：轉置

模態確認指標矩陣內各元素的值都介在0和1之間，0代表元素 MAC_{ij} 之間有一些或完全沒有相關，1代表模態向量非常的相似，因為

最佳的MAC矩陣必須為對角化，所以最佳化的結果如何可以從非對角化的數值得知。

2.3.2 奇異值分解係數 (SVDR)

在已知自由度的情況下，奇異值分解模態振形矩陣能找出感測器擺放位置，此方法為計算模態矩陣中奇異值中最大與最小值的比值 [10]。

$$SVDR = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}$$

σ_{max} ：在振形矩陣中最大的奇異值

σ_{min} ：在振形矩陣中最小的奇異值

其比值越小的位置，越適合放置感測器，而SVDR必須在模態振形為正交的前提下才能使用。

2.3.3 費雪訊息矩陣 Fisher Information Matrix (FIM)

當一個結構有 n 個自由度時，將會有 n 個模態，而此時的模態振形矩陣 Φ 會是一個 $n \times n$ 的矩陣，但通常前面幾個模態振形較為明顯且有用，所以在這取模態振形矩陣 Φ 中的部分陣形矩陣，並將其每一行的元素正規化，使每一行裡的元素絕對值的最大值為 1，在此稱

部分陣形矩陣為 $\tilde{\Phi}$ 。

本指標利用估計與真實模態振形誤差的共變異數矩陣(covariance matrix)求得有效不偏估計量(efficient unbiased estimator)，其中有效不偏估計量意味著變異數為最小，變異數越小意味著線性獨立並與實際模態越接近，反之，變異數越大表示與實際模態相差越大。而 FIM 為此共變異數矩陣的反矩陣。其 FIM 的式子為：

$$FIM = \tilde{\Phi}^T \tilde{\Phi}$$

$\tilde{\Phi}$ ：部分模態振形矩陣(假設模態振形矩陣 Φ 為 $n \times n$ 的方陣，欲取前五個模態振形， $\tilde{\Phi}$ 即為 $n \times 5$ 的矩陣，其中 n 為自由度或位置)

T ：轉置

此指標是藉由減少感測器放置位置，最後剩餘的感測器放置位置為最佳放置位置。而 FIM 有三種不同的模式來評估：行列式值、跡數 (trace) 和 FIM 最小奇異值；這些變化的目的是為了增加訊息或減少估計的不確定性。這三種模式只是不同範數的矩陣，亦即基於這些 FIM 變化的不同感測器放置方法，所得到的結果將會是大同小異。

[11, 12]

2.4 感測器配置方法比較

在 2005 年 Meo 針對橋樑之感測器配置方法的比較[13]，以及

2011 年 Marano 針對鐵塔之感測器配置方法的比較[14]，均發現以 EFI (effective independence method) 表現較為優異，此方法所使用的目標函數為 FIM。

2.5 EFI (effective independence method) 感測器配置方法

此方法透過估計與真實模態的誤差的共變異數矩陣計算，得知各感測器可放置位置的貢獻度，每次的迭代中刪除貢獻度最小的位置，反覆刪減至位置數量符合欲放置感測器數目為止。而共變異數矩陣為 FIM 的反矩陣。

以下為 EFI 的計算過程，過程中的數字與之後的範例做配合：

- (1) 透過部分模態振形矩陣轉置 $\tilde{\Phi}^T$ 與部分模態振形矩陣 $\tilde{\Phi}$ 相乘，得 FIM 矩陣，此時矩陣為方陣，其矩陣大小為取至前幾次模態振形而定。(如果 $\tilde{\Phi}$ 為 3×2 的矩陣，FIM 矩陣將會是 2×2 的矩陣，其中 3 代表同方向之自由度的 3 個位置)
- (2) 求 FIM 矩陣之特徵值 λ 與特徵向量 φ 。
- (3) 將 $\tilde{\Phi}$ 與 φ 相乘成為一個 3×2 的矩陣 η
- (4) $\tilde{\eta} = [\eta] \times [\eta]$ ， \times 意思為矩陣內同位置元素互相相乘，在此因前後

矩陣皆相同，所以結果會成為同位置元素的平方。

$$\text{範例：}\tilde{\eta}(1,1)=(\eta(1,1))^2$$

(5) 代入 $F_E = \tilde{\eta} \lambda^{-1}$ ，

(6) 將 F_E 中各行的元素進行相互相加，再加以正規化得矩陣 E_D 。

(7) 尋找出 E_D 矩陣中除了零以外的最小值，假設最小值為第 i 列，

(8) 將 $\tilde{\Phi}$ 中第 i 列的值加以刪除。

(9) 之後再重複的從 FIM 重新計算 E_D

(10) 如此反覆的迭代，直到 $\tilde{\Phi}$ 列數與欲放置的感測器數量一致為止。

此時將 $\tilde{\Phi}$ 對應到相對的自由度或位置，該自由度或位置即為感測器欲擺放的位置。

範例：

$$(1) \tilde{\Phi} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0.5 & 1 \\ 0.5 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{此為部份模態振形，第一行為第一個模態振形下}$$

各節點之位移。 $FIM = \begin{bmatrix} 3 & 4 \\ 4 & 6 \end{bmatrix}$ ，透過 $FIM = \tilde{\Phi}^T \tilde{\Phi}$ 得到 FIM，

$$(2) \varphi = \begin{bmatrix} -0.8219 & 0.5696 \\ 0.5696 & 0.8219 \end{bmatrix}, \lambda = \begin{bmatrix} 0.1140 & 0 \\ 0 & 4.3860 \end{bmatrix}, \text{分別為特徵}$$

向量與特徵值。

$$(3) \eta = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0.5 & 1 \\ 0.5 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.8219 & 0.5696 \\ 0.5696 & 0.8219 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.2523 & 1.3915 \\ 0.1586 & 1.1067 \\ 0.1586 & 1.1067 \end{bmatrix}, \eta \text{ 為 } \tilde{\Phi}$$

與 φ 相乘

$$(4) \tilde{\eta} = \begin{bmatrix} 0.0637 & 1.9363 \\ 0.0252 & 1.2248 \\ 0.0252 & 1.2248 \end{bmatrix}, \eta \text{ 內各位置元素的平方}$$

$$(5) F_E = \begin{bmatrix} 0.5585 & 0.4415 \\ 0.2207 & 0.2793 \\ 0.2207 & 0.2793 \end{bmatrix}, \text{ 帶入 } F_E = \tilde{\eta} \lambda^{-1} \text{ 所得。}$$

$$(6) E_D = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}, \text{ 將 } F_E \text{ 中第一和第二行相加，再加以正規化求得。}$$

由上述 E_D 可看出各個自由度的貢獻度，每次迭代其值都會不同，所以無法經過一次的計算就決定感測器放置位置。EFI 感測器配置方法是數值分析方法所以每次計算答案皆相同。

2.6 粒子群優化演算法

1995 年 Eberhart 和 Kennedy 提出粒子群優化演算法，此演算法是一種具有群體智慧的仿生演算法。這兩位學者經由觀察鳥類覓食的行為，進而發明了粒子群優化演算法。其演算法的概念為一群找尋食物的鳥類，一開始盲目的尋找最佳的覓食地點，接著藉著比較各個鳥自身的經驗與群體鳥類的經驗來找尋最佳地點，當各個鳥如果找到比目前更好的地點，會更新自身的經驗，當其地點為所有鳥類中最好的，則其他鳥類的移動方向也會微微朝著該一點的方向移動。

上述各個鳥在粒子群演算法中稱為粒子，粒子所在的位置代表一

個解，而由解轉化為答案，則需要透過一個目標函數來轉換，其答案又叫做目標函數值或指標值。

以下為粒子群優化演算法公式：

$$v_i^{k+1} = v_i^k + c_1 r_1 (P_{best}^k - x_i^k) + c_2 r_2 (G_{best}^k - x_i^k)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1}$$

v ：速度

c_1 、 c_2 ：學習因子

r_1 、 r_2 ：0~1 之間隨機均勻亂數

P_{best}^k ：個體的最佳位置

G_{best}^k ：整體的最佳位置

位置，如圖 2-1，經過反覆的迭代計算，最後找到最佳解與答案。

x ：位置

k ：迭代數

i ：第 i 個粒子

其一般的粒子群優化演算法流程如下(流程圖 2-2)：

- (1) 在允許範圍內隨機設置粒子初始位置與速度
- (2) 評價每一個粒子的目標函數值。
- (3) 更新每個粒子自身之最好位置(P_{best})
- (4) 更新整體所經過的最好位置(G_{best})

(5) 帶入粒子群優化演算法之公式，更新當前粒子的速度與位置

(6) 反覆計算直到設定之迭代次數或是最佳解不再變化

2.6.1 加速因子

加速因子 c_1 和 c_2 是一組藉著粒子個體經驗和群體經驗影響粒子運動軌跡的重要參數。如果 c_1 值為0，則粒子僅靠著群體經驗做為下次粒子移動的依據，這時可能造成收斂速度過快，對較複雜的問題會容易掉入局部最佳解；如果 c_2 值為0，則粒子僅藉著個體經驗做為下次粒子移動的依據，這樣就失去了粒子群優化群體搜索的特性，難以搜尋出最佳解。在一般的情況下 c_1 和 c_2 值設為2。

2.6.2 慣性權重 ω

Shi 和 Eberhart 於 1998 年提出慣性權重 ω 的概念[16]，其粒子群優化演算法公式則變為：

$$v_i^{k+1} = \omega v_i^k + c_1 r_1 (P_{best}^k - x_i^k) + c_2 r_2 (G_{best}^k - x_i^k)$$

ω ：慣性權重

慣性權重的目的在於改變上一代的速度對這一代的影響，當慣性權重大於一時，粒子速度與前一代相比會較為接近，搜尋方向較為穩定；而小於一時，會造成此項對速度的影響相對變小，使得搜尋方向

不穩定。由於問題的不同，其慣性權重值也會不盡相同，如希望加重其全域搜尋，慣性權重值需較大；相對的，如希望做局部搜尋，慣性權重值需較小。



第三章 研究方法

3.1 粒子群優化演算法

本研究使用傳統粒子群優化演算法加上慣性權重，並利用 matlab 軟體編寫此程式。在程式開始執行之前我們需要先決定欲放置的感測器數目，每一組族群相當於一個粒子，首先每一族群中產生隨機的節點編號，節點編號數量為欲放置感測器數目，並將其由小到大排列，假設域放置的感測器數目為 30，則每一族群中會一次產生 30 個隨機的點位，接著隨機產生初始速度。而後計算各族群之目標函數值，得到各族群的個體最佳解與整體最佳解。之後每族群中每個節點配上隨機初始速度帶入公式，得到新的速度，進而得知新的位置，當新的位置或速度超出範圍時，必須將其改放在臨界範圍上。每族群中每個節點移動到新的位置後，掃描每族群中的節點編號是否重覆，如有重覆，將其編號刪去並加入一個不會重複的隨機編號，最後將每族群內的編號依照小到大排序，之後再求得目標函數值，如此反覆的計算直到迭代數達到預設值為止。

3.2 目標函數 FIM

本研究採用 EFI 感測器配置方法中所使用的 FIM 當做目標函數，

有別於第二章所提的 EFI 感測器配置方法，藉由貢獻度大小來刪除部分模態振形矩陣 $\tilde{\Phi}$ ，使得 FIM 產生變化，直到 $\tilde{\Phi}$ 矩陣的列數等於欲放置感測器數為止。因為 FIM 為共變異數的倒數，所以當目標函數值越大代表共變異數越小，越接近真實的模態振形。在本研究粒子群優化演算法中所要使用的目標函數為 $|\det(\Sigma\tilde{FIM})|$ ，其中 \tilde{FIM} 計算方式有別於之前 FIM 敘述的透過 $\tilde{\Phi}$ 來計算，在此因為粒子群優化演算法在每一族群中會產生符合感測器數目的節點編號，每一編號對應到一個位置，找出該位置為部分模態振形矩陣 $\tilde{\Phi}$ 中的第幾列，最後將其列的數據取出我們將其稱為 $\bar{\Phi}$ ，最後在做 $\bar{\Phi}^T\bar{\Phi}$ 的計算得 \tilde{FIM} 矩陣，最後將每個節點所求得的 \tilde{FIM} 矩陣相加得 $\Sigma\tilde{FIM}$ 矩陣，上述的計算也等同將所有節點對應到的 $\bar{\Phi}$ 矩陣組成 Ω 矩陣，(假設設定感測器數量為 6，模態振型為前 5 個， Ω 即為一個 6 x 5 的矩陣)，然後再做 $\Omega^T\Omega$ 的計算，其結果會等同於 $\Sigma\tilde{FIM}$ 矩陣。最後計算 $\Sigma\tilde{FIM}$ 矩陣行列式值並加上絕對值，及計算出該感測器配置時的目標函數值。

以下為透過節點編號求得其目標函數值的方法：

- (1) 將每一族群中所有的節點編號，對應到部分模態振形矩陣 $\tilde{\Phi}$ 中的列，即為 $\bar{\Phi}$ 矩陣，將其取出並組成 Ω 矩陣做 $\Omega^T\Omega$ 的計算求其 $\Sigma\tilde{FIM}$ 。

範例：假設部分模態振形矩陣 $\tilde{\Phi}$ 取至前五個模態振形，而該族群

節點編號有 2, 3, 6, 9, 11, 15, , 則分別挑出部分模態振形矩陣 $\tilde{\Phi}$ 中的第 2, 3, 6, 9, 11, 15 列的數值, 即為 $\bar{\Phi}$ 矩陣, 最後加以組合成為一個 6×5 的 Ω 矩陣, 將其矩陣做 $\Omega^T \Omega$ 的計算求得 5×5 的方陣, 其方陣即為 $\Sigma\tilde{F}\tilde{M}$

(2) 最後我們會得到 $\Sigma\tilde{F}\tilde{M}$ 方陣, 將其取行列式值, 並取絕對值, 其值即為粒子群優化演算法所需的目標函數值。目標函數值公式為

$$|\det(\Sigma\tilde{F}\tilde{M})|。$$

| | : 絕對值

det : 行列式值

以下為範例 :

$$\tilde{\Phi} = \begin{bmatrix} 0.3789 & -0.6915 & 0.1593 & 0.6724 & 0.3159 \\ 0.4194 & -0.6502 & 0.3289 & 0.5409 & 0.5759 \\ 0.4611 & -0.5915 & 0.4730 & 0.3388 & 0.7116 \\ 0.5036 & -0.5161 & 0.5814 & 0.0933 & 0.6938 \\ 0.5469 & -0.4249 & 0.6459 & -0.1623 & 0.5269 \\ 0.5908 & -0.3193 & 0.6611 & -0.3929 & 0.2477 \\ 0.6353 & -0.2008 & 0.6245 & -0.5666 & -0.0818 \\ 0.6802 & -0.0710 & 0.5368 & -0.6582 & -0.3884 \\ 0.7254 & 0.0680 & 0.4015 & -0.6522 & -0.6024 \\ 0.7709 & 0.2145 & 0.2244 & -0.5449 & -0.6723 \\ 0.8166 & 0.3665 & 0.0133 & -0.3438 & -0.5749 \\ 0.8624 & 0.5225 & -0.2228 & -0.0659 & -0.3186 \\ 0.9082 & 0.6807 & -0.4753 & 0.2659 & 0.0618 \\ 0.9541 & 0.8402 & -0.7362 & 0.6275 & 0.5166 \\ 1.0000 & 1.0000 & -1.0000 & 1.0000 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0.4194 & -0.6502 & 0.3289 & 0.5409 & 0.5759 \\ 0.4611 & -0.5915 & 0.4730 & 0.3388 & 0.7116 \\ 0.5908 & -0.3193 & 0.6611 & -0.3929 & 0.2477 \\ 0.7254 & 0.0680 & 0.4015 & -0.6522 & -0.6024 \\ 0.8166 & 0.3665 & 0.0133 & -0.3438 & -0.5749 \\ 1.0000 & 1.0000 & -1.0000 & 1.0000 & 1.0000 \end{bmatrix},$$

$$\Sigma\tilde{F}\tilde{M} = \Omega^T \Omega = \begin{bmatrix} 2.9306 & 0.6145 & 0.0487 & 0.3971 & 0.8096 \\ 0.6145 & 2.0135 & -1.6725 & 0.4030 & -0.1261 \\ 0.0487 & -1.6725 & 1.9303 & -1.1881 & -0.5597 \\ 0.3971 & 0.4030 & -1.1881 & 2.1054 & 2.0458 \\ 0.8096 & -0.1261 & -0.5597 & 2.0458 & 2.5928 \end{bmatrix}$$

$$|\det(\Sigma\tilde{F}\tilde{M})| = 0.0014$$

3.3 粒子群優化演算法應用於感測器最佳化配置之搜尋策略

以下為使用上述粒子群優化演算法時所發現的缺陷：

1. 收斂過早。
2. 當解決感測器配置問題中節點數選擇過多，排列組合太過龐大無法輕易找到最佳解。
3. 當粒子群的變數越多時越難找到最佳解。
4. 單純的增加迭代數與族群數來達到搜尋效果有限。

以下分別為針對感測器最佳化配置問題之搜尋策略：

- A. 移民：為了防止過早收斂的問題，本研究在每次迭代時隨機刪除

最佳解之外的組合，並加入隨機組合，刪除的數量為族群數量的百之十。此目的為使演算法計算時，有機會使其往未知的地方搜尋，並減緩其收斂速度。此策略在程式計算出目標函數值，並比較大小後執行，其流程圖將改為圖 3-1。本策略將會利用分析模型二時，比較執行本策略時迭代過程的收斂變化。

B. 分區：將節點分成數個分區，並先各自找尋該分區的最佳解，之後將各分區的最佳解兩兩組合再求最佳解，如此反覆執行多層的粒子群優化演算法直到最佳解剩下一組為止，分區策略如圖 3-2 所示。在開始計算前必須計算節點需分成多少分區，進而得之需進行幾層粒子群優化演算法，本研究設定每 60 左右的節點為一分區。每一區域之點位由小到大排列，最後以一到區域總結點數代表原本節點編號，如範例圖 3-3，如沒有上述編號，會造成演算法計算過程中，得到不屬於該區域的節點編號。而加入分區策略後的粒子群優化流程圖如圖 3-4。

C. 分取：把變數量分成幾階段計算，每次演算法只求出部分的變數，經多個階段的計算，當變數量的累積達到設定值，此時變數即為此計算所求得的最佳解。而加入分取策略後的粒子群優化流程圖如圖 3-5 所示。本研究將在分析模型二中感測器配置時，執行此策略，將欲求的 30 個感測器分 3 階段來求得，所以在初期隨機產生

的節點數將改為 10 個，接著執行粒子群優化演算法，求得 10 個最佳節點，然後再執行第二次粒子群優化演算法以求得另 10 個最佳節點，此時隨機初始點的選擇內容將刪除掉前一次已找到的 10 個最佳節點，而目標函數值在計算時將加上前次的 10 個最佳節點的 FIM 方陣。此策略將經由一個簡易的平方合最小值的問題來證明，我們將分別採用 10 個變數與 30 個變數，來證明使用較多的變數會對粒子群優化演算法造成準確度的降低。

- D. 為了避免主要的節點過於集中在結構中某些部分，使得規律分區策略的效果下降，所以在節點分區時係採用隨機分配，計算流程與原本粒子群優化演算法相同。本策略將會利用分析模型二時，比較執行隨機分區與規律分區的差異，隨機分區策略如圖 3-6 所示。

3.4 模型建立

本研究將使用四種模型，此四種模型皆使用 SAP2000 建置，並利用其軟體做動態分析，而部分模態振形矩陣取前五個模態振形。

- I. 模型一：懸臂梁（圖 3-7）

長：6 m（每段 0.2 m）

節點數：31

感測器數：5

彈性模數 (E)：24.86 G Pa

剪力模數 (G)：10.35 G Pa

計算次數：1500

分析模型一之目的：證明編寫之粒子群優化程式與 EFI 程式可以順利運行。

II. 模型二：2D 橋面板 (圖 3-8)

長：15 m (每塊長 0.5 m)

寬：3.5 m (每塊寬 0.5 m)

厚：0.25 m

節點數：248

感測器數：30 個

彈性模數 (E)：24.86 G Pa

剪力模數 (G)：10.35 G Pa

計算次數：900000

兩端設定為固定端

分析模型二之目的：與模型一相比節點數為模型一的 8 倍，使得傳統粒子群優化搜尋效果較差，所以將藉此模型比較施行各種策略後的改善效果。

III. 模型三：立體箱型橋（圖3-9圖3-10圖3-11圖3-12）

長：150 m

寬：8.4 m、5.4 m、4.2 m（橋面板至箱型梁）

箱型高：1.6 m

柱高：10 m

節點數：592

感測器數：30 個

彈性模數 (E): 24.86 GPa

剪力模數 (G): 10.35 GPa

計算次數：900000（為迭代數乘上族群數）

分析模型三之目的：此模型又更進一步的增加節點數，並有別於模型二的橋面板，類似做局部的搜尋，模型三使用三跨的橋梁，做柱以上之橋面部分的全域搜尋，為了證明實施的搜尋策略不是只能解決單一的特殊問題。

IV. 模型四：2D 橋面板（圖 3-13）

長：15 m（每塊長 0.5 m）

寬：3.5 m（每塊寬 0.5 m）

厚：0.25 m

節點數：248

感測器數：30 個

彈性模數 (E)：24.86 G Pa

剪力模數 (G)：10.35 G Pa

計算次數：900000

兩端設定為固定端

不能放置感測器之點位：95 96 103 104 145 146 151 152

153 154 159 160

分析模型四之目的：當某些部分無法放置感測器時，執行粒子群
優化演算法時的搜尋效果。



第四章 結果與討論

在傳統粒子群優化演算法完成後，即能分析模型一之懸臂梁之感測器配置位置，且結果與 EFI 感測器配置方法一致，但是在分析模型二之橋面板，傳統的粒子群演算法無法分析出其感測器最佳化配置位置。此時採用搜尋策略即可發揮其效用，加強傳統粒子群演算法之搜尋能力。經由模型三之 3D 橋面板與限制感測器放置位置之模型四橋面板，證明此改梁策略皆可解決此類問題。本章節在分析模型二到模型四時，計算次數皆為 900000 次，同樣的問題重覆分析 30 次，欲擺放的感測器數量皆為 30 個。

4.1 模型一：懸臂樑

模型一為一維的懸臂樑，經粒子群演算法所獲得的感測器最佳配置點位列於表 4-1 並示於圖 4-1。此模型的排列組合計有 169,911 種，由於模型一的組合種類相對較少，所以利用傳統的粒子群優化演算法，在族群數為 300，迭代數為 5 的情況下(總計算次數 1500)，即可搜尋到跟 EFI 感測器配置方法相同的解 18.494，其收斂的迭代次數落於 2~4 之間，(圖 4-2 為隨機附上一組分析時的目標函數值與迭代次數關係圖)，實際搜尋到與 EFI 相符的解的計算次數介於 600~1200 之間，

目標函數值則為 18.1494。此簡單一維模型的測試，顯示本研究所設計的程式，可以順利執行粒子群優化演算法與 EFI 感測器配置方法，並能成功地搜尋到與 EFI 感測器配置方法相同的感測器最佳放置位置。

4.2 模型二：2D 橋面板

模型二為二維的橋面板，此模型的排列組合為 4.13×10^{38} 種組合，傳統的粒子群演算法無法搜尋到較佳的答案，圖 4-3 為單純的增加計算次數至兩倍所得到之結果，目標函數值為 7.1816×10^5 ，其目標函數值與 EFI 感測器配置方法相差勝遠，故需藉著加入搜尋策略，以提升目標函數值，並求得與 EFI 感測器配置方法相似甚至更佳的解。如前章節所述，本研究在傳統的粒子群演算法中加入了三種搜尋最佳解的搜尋策略：移民、分區、分取，以期有效改善粒子群演算法處理較大系統的搜尋效率。以下將以模型二為典型示範例，逐一探討添加了移民、分區、分取等搜尋策略後所獲致的效果，進而驗證本研究所提出的搜尋策略，可以有效提高粒子群演算法處理大型系統之感測器最佳配置的搜尋效率。

4.2.1 策略一：移民

圖 4-4 中兩條線分別為未加入「移民」策略與加入「移民」策略的情況下，處理模型二之迭代過程，目標函數值的變化情形；本系列的計算使用的族群數為 1000 和迭代數為 60。此處比較的主要目的不是在求得感測器最佳化配置；而是用來驗證加入「移民」策略的有效性。圖 4-3 之比較可以明顯看出未加「移民」策略的粒子群演算法，於迭代次數為 10 時，目標函數值開始趨於平緩；而加入「移民」策略後的粒子群演算法，其目標函數值在迭代次數 10 以後，還有繼續爬升的趨勢。另外從圖 4-5 之目標函數值之平均值與標準差與傳統的粒子群演算法比較，可證實加入「移民」策略的搜尋確實具有減緩收斂速度的效果，並有機會將粒子往新的領域搜尋，甚至得到更好答案。

4.2.2 策略二：分區

原本模型二節點排列組合數量為 4.13×10^{38} ，藉著分區策略，使排列組合數減少到 2.155×10^{18} ，而根據圖 4-6 為整體搜尋與規律分區搜尋之目標函數值之平均值的比較，很明顯的使用「規律分區」策略之目標函數值為 11.31×10^5 ，該值遠高於採用整體搜尋策略的 6.23×10^5 。因此證明了分區策略，藉著減少排列組合數量，確實能達到提高搜尋精準度之效果。

4.2.3 策略三：分取

為了證明分取之效用，利用 10 個變數與 30 個變數，兩者均使用傳統粒子群優化演算法，搜尋變數平方和最小值問題。其族群數皆為 1000，迭代數為 30，範圍介於 5~-5，圖 4-7 為不同變數平方和的平均值，而其中 10 個變數之平均值為 2.188，為了比較其準確性，將其數值乘以三，變為 6.564，從該圖可得知 10 個變數所得到平方和乘以三比 30 個變數的 12.988 來的小，此例證明在粒子群優化演算法中，需求得的變數越少，所得到的答案越為準確。

4.2.4 模型二各種策略比較

在粒子群優化演算法採用上述各種不同策略時，圖 4-8 分別為分析後的目標函數值之平均值與標準差，可以明顯的看出對演算法搜尋成果之貢獻程度的比較。從目標函數值之平均值可以得知，同時採用三種搜尋策略下的粒子群優化演算法，其目標函數值之平均值為 2.1582×10^6 是最為優異的，而在 30 次的計算中有 25 次搜尋到此演算法所搜尋到最大的目標函數值 2.1587×10^6 ，而 EFI 感測器配置方法所得到的點位轉換成目標函數值為 2.1573×10^6 ，圖 4-9 為 EFI 與其演算法的比較。

採用「分取」策略的效果雖然比採用「移民」策略來的好；但其收斂速率過快，使得其標準差較大，當加入「移民」策略所得到的標準差相對較低，這也更進一步的證明採用「移民」策略，可達到延緩收斂速率的效果，使求得的答案較為穩定。

依據本研究之計算結果，本模型的感測器配置的最佳點位為標示於表 4-2，其演算法搜尋到最佳目標函數值為 2.1587×10^6 ，因對稱關係，最佳放置點位有四種，其目標函數值皆相同，由圖 4-10 至圖 4-13 可明顯看出其對稱特性，圖中三角形所在的位置為四種解中有所不同的點位，圓圈代表四種解下皆有相同的位置。

4.2.5 隨機分區與規律分區之比較

圖 4-14 分別為隨機分區與規律分區的目标函數值之平均值與標準差之比較。從這兩圖的比較可發現兩者並沒有太大的差異，隨機分區目标函數平均值為 2.1581×10^6 ，規律分區目标函數平均值為 2.1582×10^6 ，因此為了避免未來分析別種類模型時，其重要點位可能過於集中，而造成分區效果的下降，因此本研究後續的搜尋均採用隨機分區的方式進行。

4.3 模型三：箱型橋

模型三為三維的箱型橋面板，搜尋中最佳點位為表 4-3 所示，圖 4-15 表示其模型三中感測器位置，圖 4-16 分別表示其目標函數值之平均值與標準差、搜尋到的最佳解與 EFI 感測器配置方法。此問題排列組合數量為 2.74×10^{49} ，其目標函數值之平均值為 6.3076×10^5 ，最佳解為 6.3635×10^5 ，與 EFI 感測器方法相同，此結果證明模型二所提及的搜尋策略，不是只能解決單一的特殊形狀的問題。而從感測器配置的情況發現，與模型二感測器配置位置分部類似，皆位於兩支承中間部分與橋面兩側，且只位於上層橋面板上。

4.4 模型四：限制感測器放置位置

模型四外型同為模型二，但假設 95, 96, 103, 104, 145, 146, 151, 152, 153, 154, 159, 160，這些節點編號所在的位置無法放置感測器，圖 4-17 證明在限制感測器可放置位置的情況下，依然能搜尋到與模型二相同的解，目前最佳目標函數值為 2.1587×10^6 。但從圖 4-18 中表示的目標函數值之平均值與標準差。

第五章 結論與建議

透過第四章所得到的數據分析，證明了搜尋策略的成功，並解決感測器配置最佳化問題，以下為本研所得到的結論，與對此研究可以延伸討論的問題。

5.1 結論

1. 本研究嘗試純粹增加其迭代次數與族群數，試圖使搜尋效果變佳，實際驗證發現效果有限。所以需使用搜尋策略來增加其準確度。
2. 本研究藉著目標函數值改變時所對到的迭代次數，與後續模型二策略各種組合標準差之比較，證明「移民」策略確實能降低粒子群優化演算法的收斂速度，並能有效提升最佳化搜尋的穩定度。
3. 本研究利用分析模型二之結果比較，證明「分區」策略確實能改善，因系統可能之排列組合過多，而造成粒子群優化演算法感測器最佳配置搜尋之準確度下降的現象。
4. 本研究利用變數平方和的最小值，證明同時所取的變數過多，會對答案的精準度造成影響，而採用「分取」策略於分析模型二時，發現解答的精準度確實明顯地提高。本研究也嘗試過將變數分的更細，效果依然存在，但考慮到計算次數增加，造成花費時間增加，最後決定將變數分成三階段進行搜尋。

5. 粒子群優化演算法執行上述三種搜尋策略，在模型二與三中 30 次計算中有 25 次可搜尋到所以搜尋中最大的目標函數值，其值甚至比 EFI 感測器配置方法來的高。
6. 模型三的分析證明上述的搜尋策略，效果不是只是針對單一模型或是局部搜尋，在其它模型或全域搜尋上依然有其功效在。
7. 模型四中雖然 30 次的計算只有 11 次能搜尋到目前搜尋中，最大的目標函數值，可見限制感測器放置位置會導致精準度下降，但是還是有機會搜尋到較佳的解。
8. 分析中發現粒子群優化演算法有機會能搜尋到比 EFI 感測器配置方法大的目標函數值。
9. 以上分析的計算次數為族群數乘上迭代數，並在數量上的拿捏較為保守。
10. 本研究所遇到的困難，以下為失敗測試內容：

(1) 測試過節點座標轉換成 XY 座標，分別對 X 座標與 Y 座標進行粒子群優化的計算，此方法在使用分區策略時，搜尋結果有機會搜尋到不在該區內的節點編號，使得搜尋失敗無法搜尋出較佳的解。

(2) 測試使用混合式粒子群優化演算法，其演算法為在計算目標函數值後，取較優異的組合進行額外的局部搜尋方法，但結

果不如預期。

5.2 建議

1. 本研究感測器皆假設為有線的感測器，近年來無線的感測器也漸漸的被人採用，但是無線感測器資料傳輸的距離有限，所以經由演算法所求得的感測器位置，彼此之間的距離可能超過無線感測器能傳輸的距離。為了解決這個問題，可以從改寫演算法，或是使用演算法求得有線感測器放置位置後，再來滿足無線感測器的距離限制。
2. 無線感測器的強健性也是研究的課題，當其中一個感測器損壞無法傳輸資料時，是否有其它的感測器可以接替其資訊繼續傳輸的任務，使得無線感測器網路能繼續使用。

參考文獻

- [1] A. Deraemaeker, E. Reynders, G. De Roeck, and J. Kullaa, “Vibration-based structural health monitoring using output only measurements under changing environment,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 22, no. 1, pp. 34–56, 2008.
- [2] H. N. Li, T. H. Yi, X. D. Yi, and G. X. Wang, “Measurement and analysis of wind-induced response of tall building based on GPS technology,” *Advances in Structural Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 83–93, 2007.
- [3] H. Li, T. Yi, M. Gu, and L. Huo, “Evaluation of earthquake induced structural damages by wavelet transform,” *Progress in Natural Science*, vol. 19, no. 4, pp. 461–470, 2009.
- [4] G. W. Housner, L. A. Bergman, T. K. Caughey et al., “Structural control: past, present, and future,” *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 123, no. 9, pp. 897–971, 1997.450–459, 2011.
- [5] R. Eberhart and J. Kennedy, “New optimizer using particle swarm theory,” in Proceedings of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science, pp. 39–43, Nagoya, Japan, October 1995.
- [6] J.M. Ko and Y. Q. Ni, “Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges,” *Engineering Structures*, vol. 27,

no. 12, pp. 1715–1725, 2005.

- [7] F. E. Udewadia, “Methodology for optimum sensor locations for parameter identification in dynamic systems,” *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 120, no. 2, pp. 368–390, 1994.
- [8] C. R. Pickrel, “Practical approach to modal pretest design,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 13, no. 2, pp. 271–295, 1999.
- [9] T. G. Carne and C. R. Dohmann, “A modal test design strategy for modal correlation,” in *Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference*, pp. 927–933, Schenectady, NY, USA, February 1995.
- [10] G. H. Golub and C. F. Van Loan, *Matrix Computations*, Johns Hopkins University Press, 1996.
- [11] M. Basseville, A. Benveniste, G. V. Moustakides, and A. Rougee, “Optimal sensor location for detecting changes in dynamic behavior,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 32, no. 12, pp. 1067–1075, 1987.
- [12] C. T. Pan, “On the existence and computation of rankrevealing LU factorizations,” *Linear Algebra and Its Applications*, vol. 316, no. 1–3, pp. 199–222, 2000.
- [13] Meo, Michele, and G. Zumpano. "On the optimal sensor placement techniques for a bridge structure." *Engineering Structures* 27.10

(2005): 1488-1497.

- [14] Marano, Giuseppe Carlo, Giorgio Monti, and Giuseppe Quaranta. "Comparison of different optimum criteria for sensor placement in lattice towers." *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 20.8 (2011): 1048-1056.
- [15] D. C. Kammer, "Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 14, no. 2, pp. 251–259, 1991.
- [16] Shi, Yuhui, and Russell Eberhart. "A modified particle swarm optimizer." *Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference on.* IEEE, 1998.
- [17] A. R. M. Rao and G. Anandakumar, "Optimal placement of sensors for structural system identification and health monitoring using a hybrid swarm intelligence technique," *Smart Materials and Structures*, vol. 16, no. 6, pp. 2658 – 2672, 2007.
- [18] Yi, Ting-Hua, and Hong-Nan Li. "Methodology developments in sensor placement for health monitoring of civil infrastructures." *International Journal of Distributed Sensor Networks* 2012 (2012).

附表

表 4-1 模型一之感測器最佳化配置

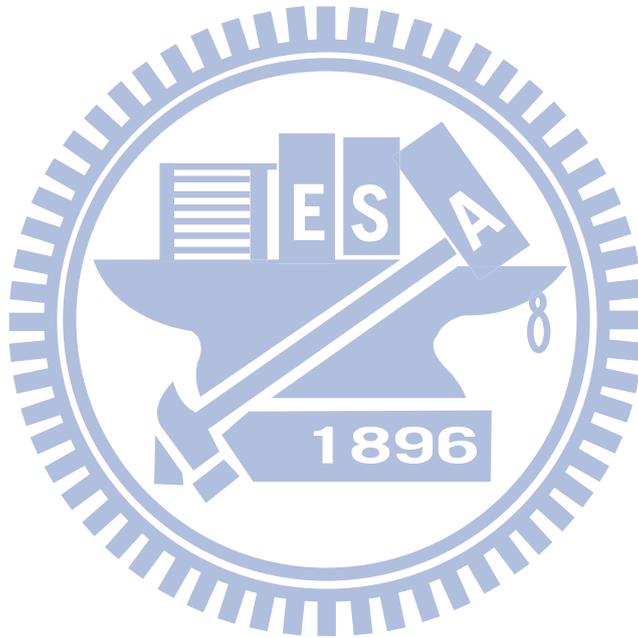
種類	位置
1.	7 13 19 25 31

表 4-2 模型二之感測器最佳化之位置

種類	位置
1.	49 56 57 64 65 72 73 80 81 88 105 112 113 120 121 128 129 136 144 153 161 168 169 176 177 184 185 192 193 200
2.	49 56 57 64 65 72 73 80 81 88 105 112 113 120 121 128 129 136 137 160 161 168 169 176 177 184 185 192 193 200
3.	49 56 57 64 65 72 73 80 81 88 96 105 113 120 121 128 129 136 137 144 161 168 169 176 177 184 185 192 193 200
4.	49 56 57 64 65 72 73 80 81 88 89 112 113 120 121 128 129 136 137 144 161 168 169 176 177 184 185 192 193 200

表 4-3 模型三之感測器最佳化之位置

種類	位置
1.	61 71 77 81 87 91 97 101 107 117 251 257 261 267 271 277 281 287 291 297 441 451 457 461 467 471 477 481 487 497



附圖

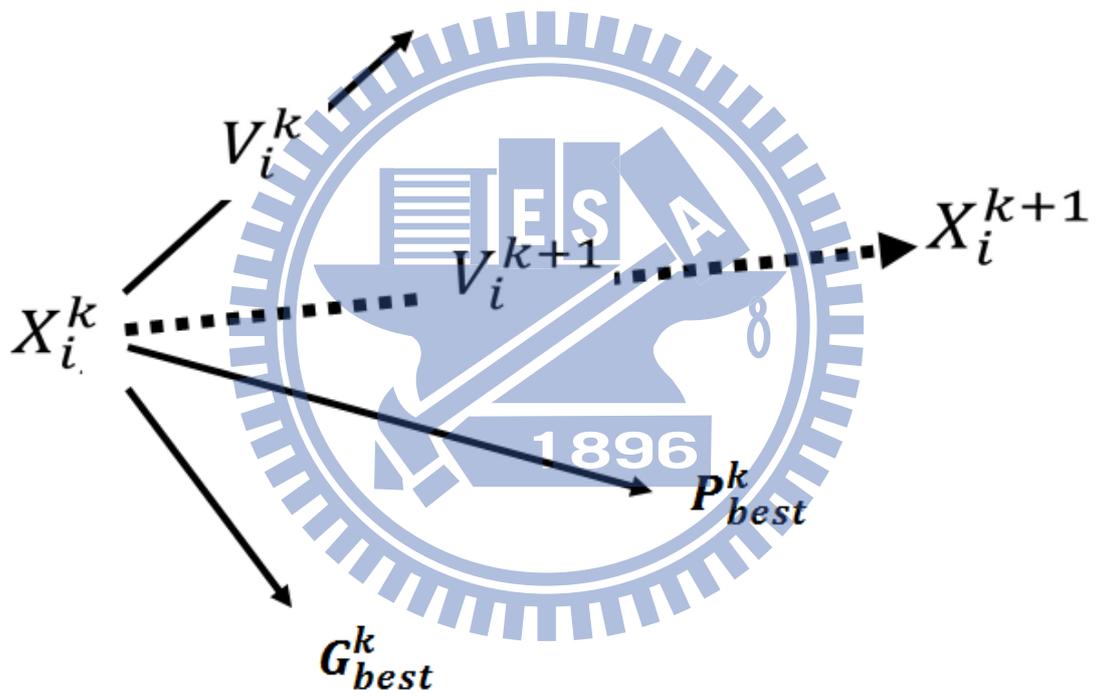


圖 2-1 粒子群優化演算法其速度和位置更新示意圖

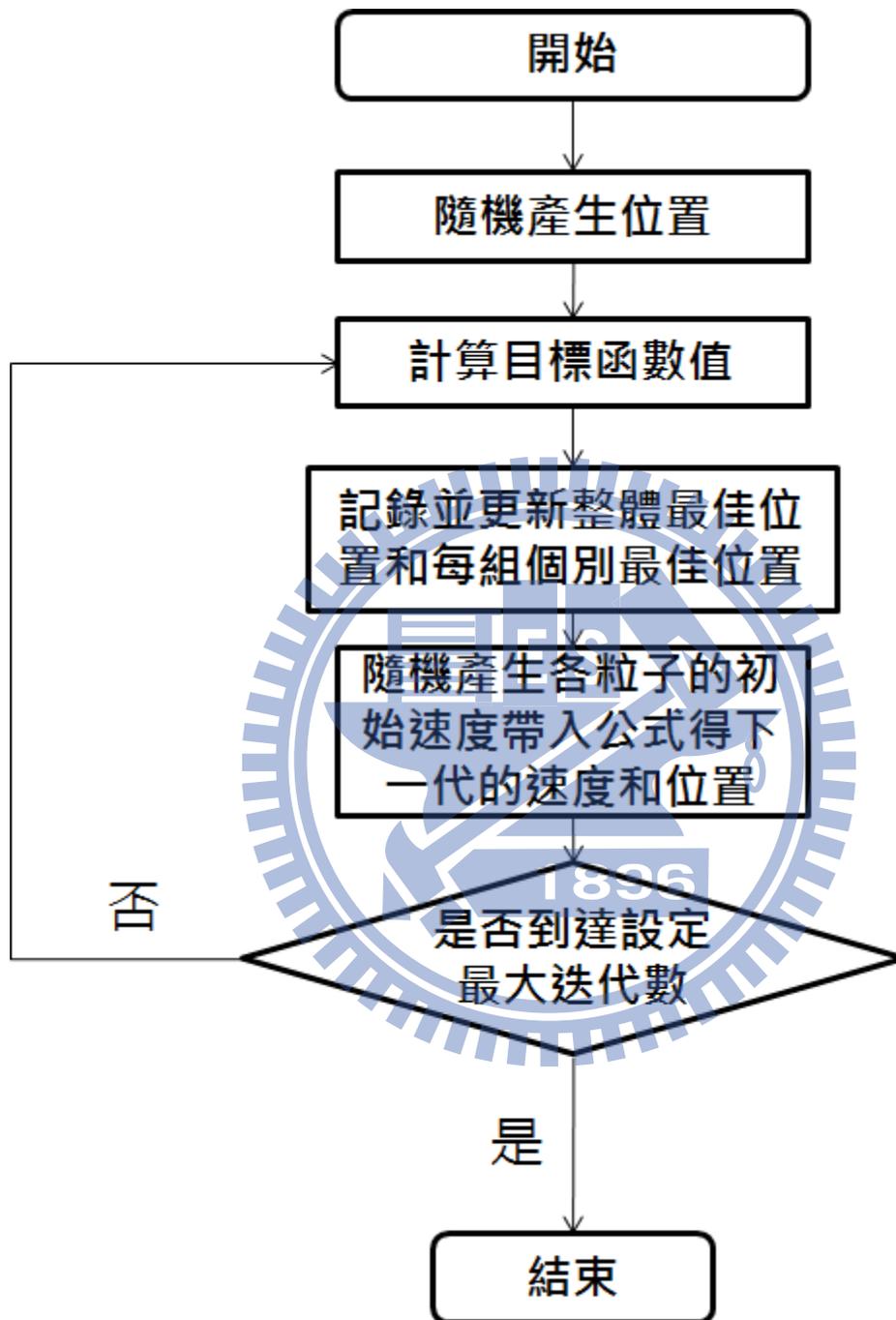


圖 2-2 傳統粒子群優化演算法流程圖

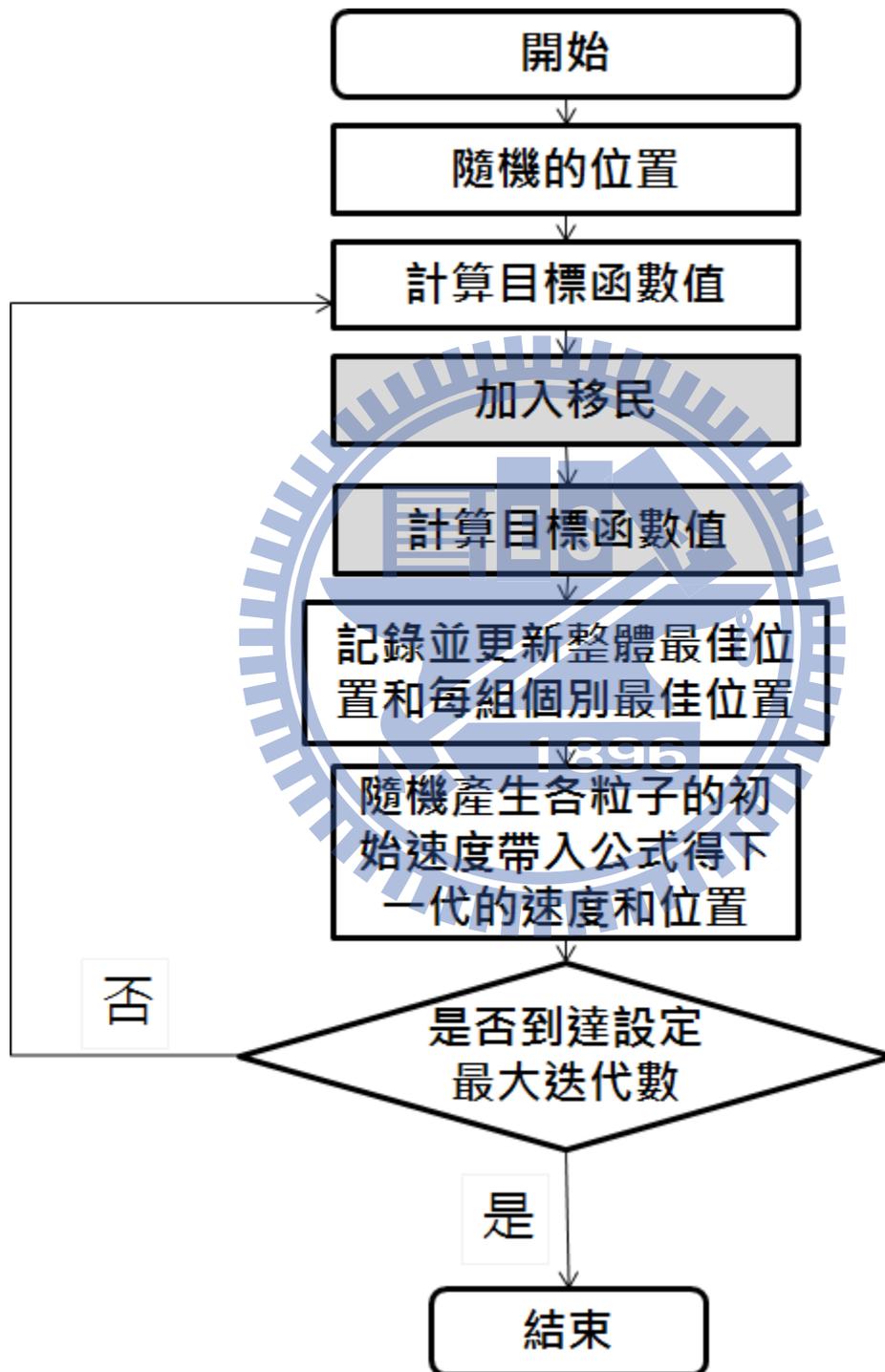


圖 3-1 加入移民策略之流程圖

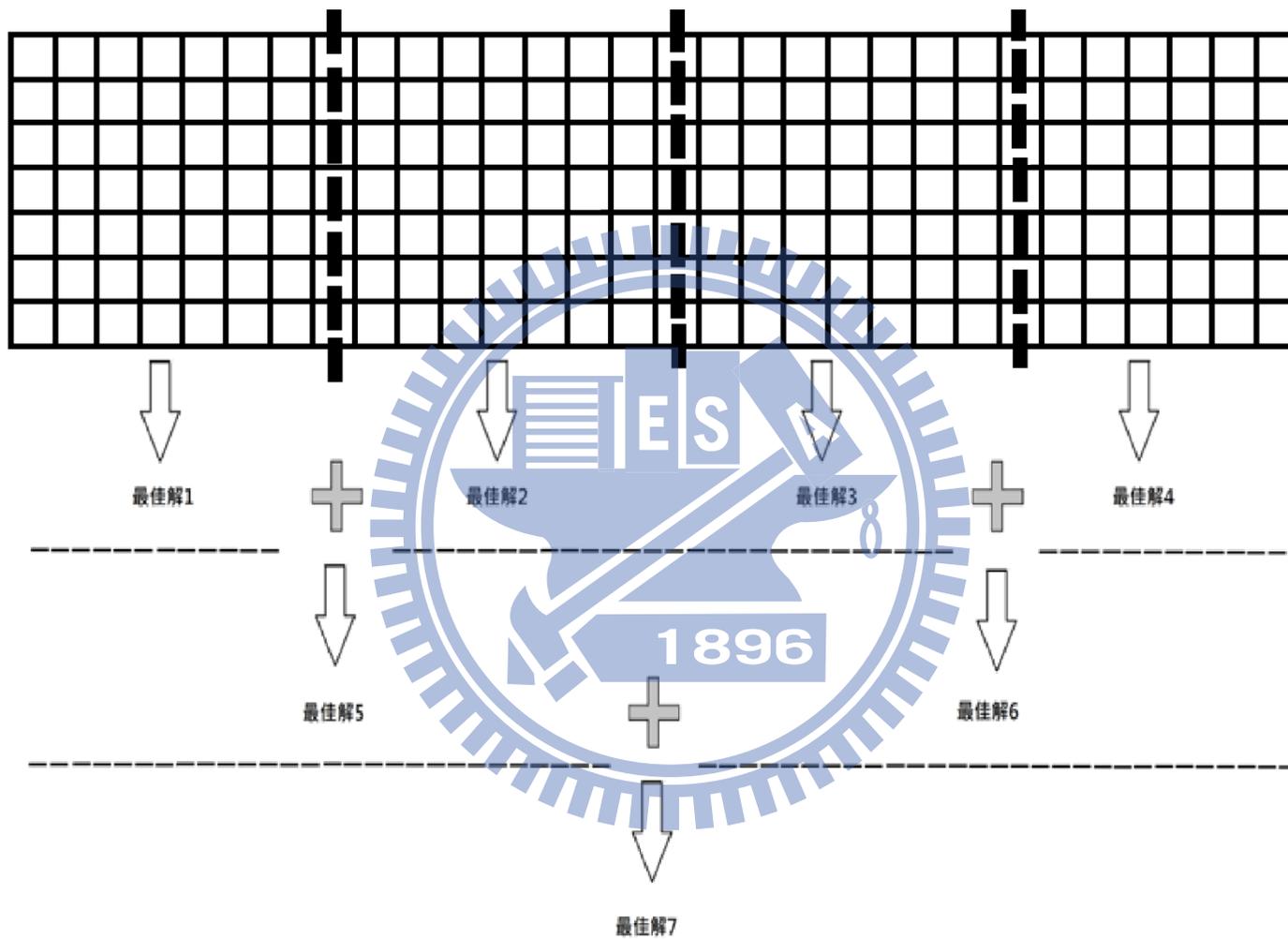


圖 3-2 規律分區策略示意圖

實際節點編號：4 5 6 7 9 14 19 29 30 35 41 45 46 50 54 59 69 71 75 81 88 91 94 95 105 109 112 123 124 125
節點代號：1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30

實際節點編號：130 137 141 151 155 159 160 164 165 167 168 172 173 177 181 183 190 191 197 203 207 222 227 231 236 238 243 244 246 247
節點代號：31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60

圖 3-3 節點編號使用代號表示之示意圖

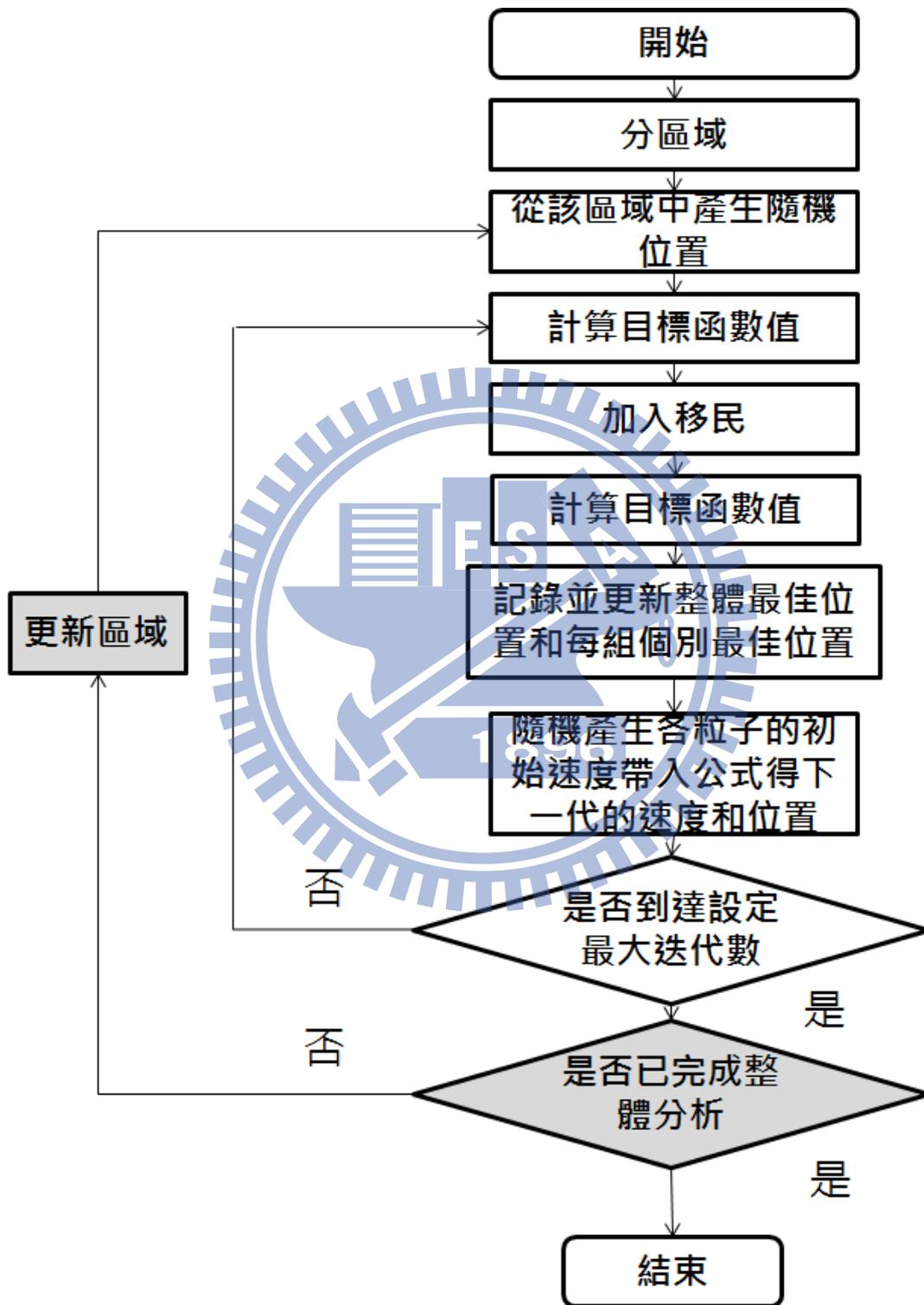


圖 3-4 加入分區策略之流程圖

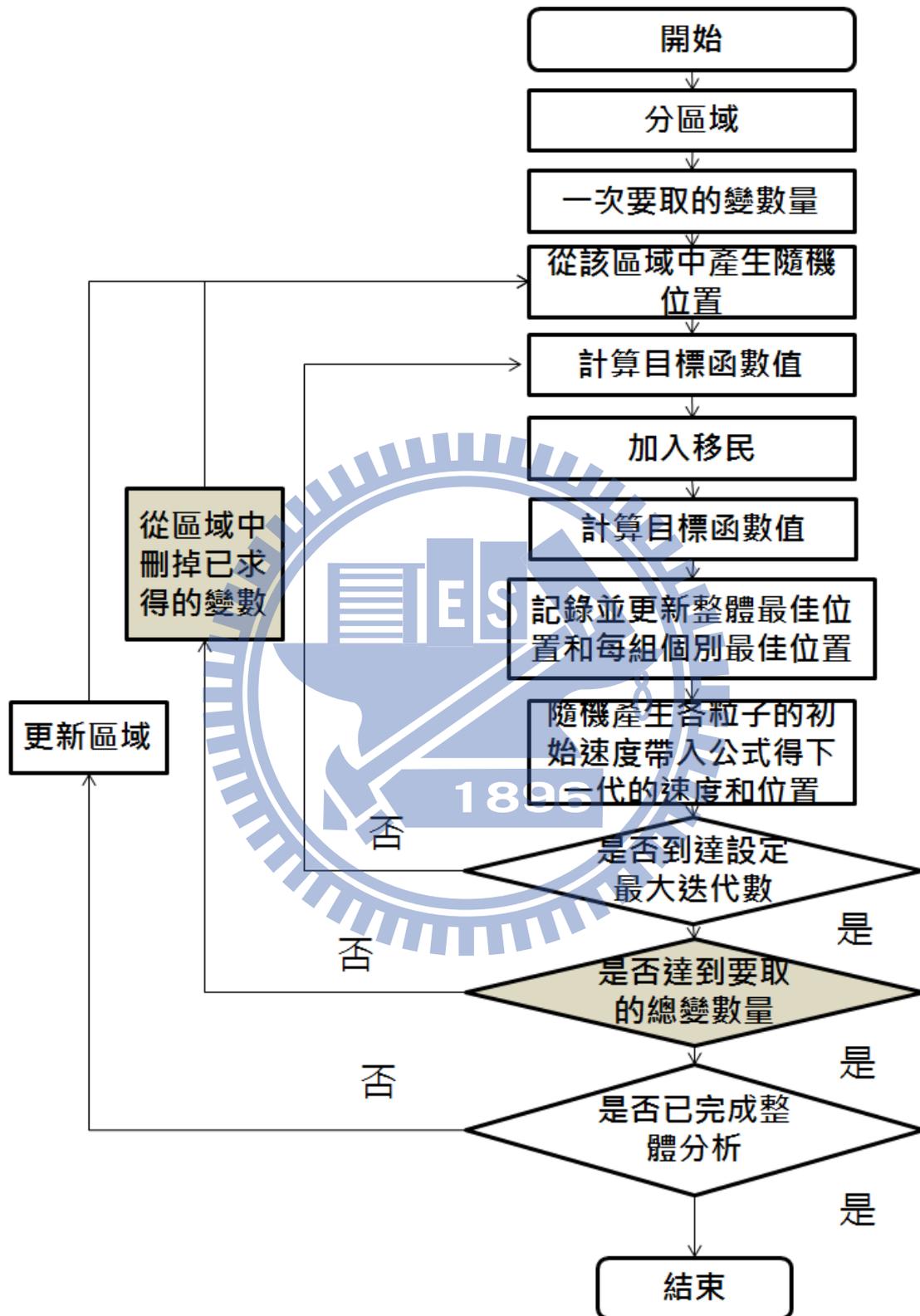


圖 3-5 加入分取策略之流程圖

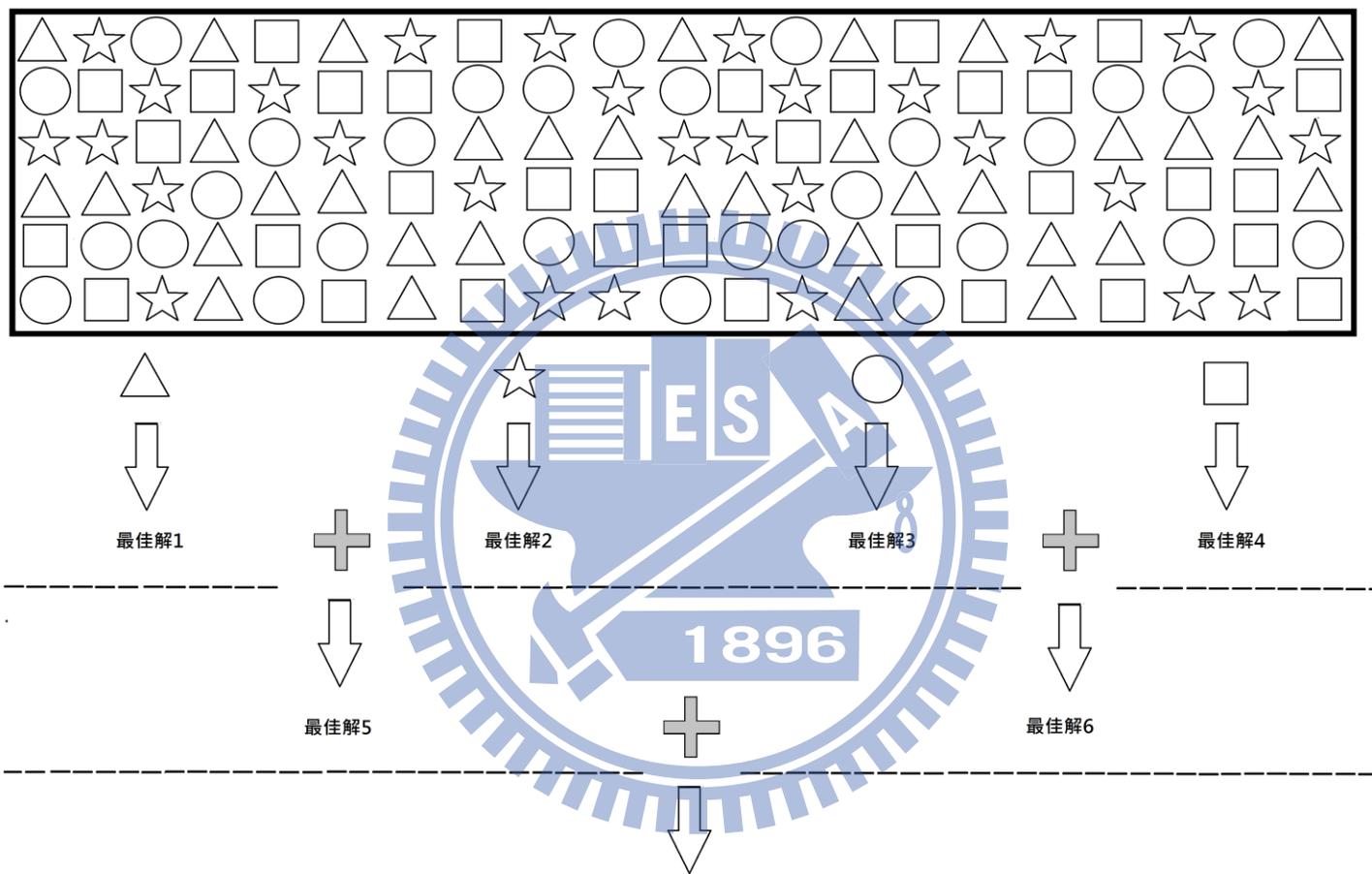


圖 3-6 隨機分區策略示意圖



圖 3-7 模型一：懸臂梁圖

長：6 m (每段 0.2 m)

彈性模數(E): 24.86 G Pa

節點數：31

剪力模數 (G): 10.35 G Pa

感測器數：5

計算次數：1500

8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96	104	112	120	128	136	144	152	160	168	176	184	192	200	208	216	224	232	240	248
7	15	23	31	39	47	55	63	71	79	87	95	103	111	119	127	135	143	151	159	167	175	183	191	199	207	215	223	231	239	247
6	14	22	30	38	46	54	62	70	78	86	94	102	110	118	126	134	142	150	158	166	174	182	190	198	206	214	222	230	238	246
5	13	21	29	37	45	53	61	69	77	85	93	101	109	117	125	133	141	149	157	165	173	181	189	197	205	213	221	229	237	245
4	12	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92	100	108	116	124	132	140	148	156	164	172	180	188	196	204	212	220	228	236	244
3	11	19	27	35	43	51	59	67	75	83	91	99	107	115	123	131	139	147	155	163	171	179	187	195	203	211	219	227	235	243
2	10	18	26	34	42	50	58	66	74	82	90	98	106	114	122	130	138	146	154	162	170	178	186	194	202	210	218	226	234	242
1	9	17	25	33	41	49	57	65	73	81	89	97	105	113	121	129	137	145	153	161	169	177	185	193	201	209	217	225	233	241

圖 3-8 模型二：兩端為固定端之橋面板圖

長：15 m(每塊長 0.5 m) 彈性模數(E)：24.86 G Pa

寬：3.5 m(每塊寬 0.5 m) 剪力模數 (G)：10.35 G Pa

厚：0.25 m 節點數：248

感測器數：30 個 計算次數：900000

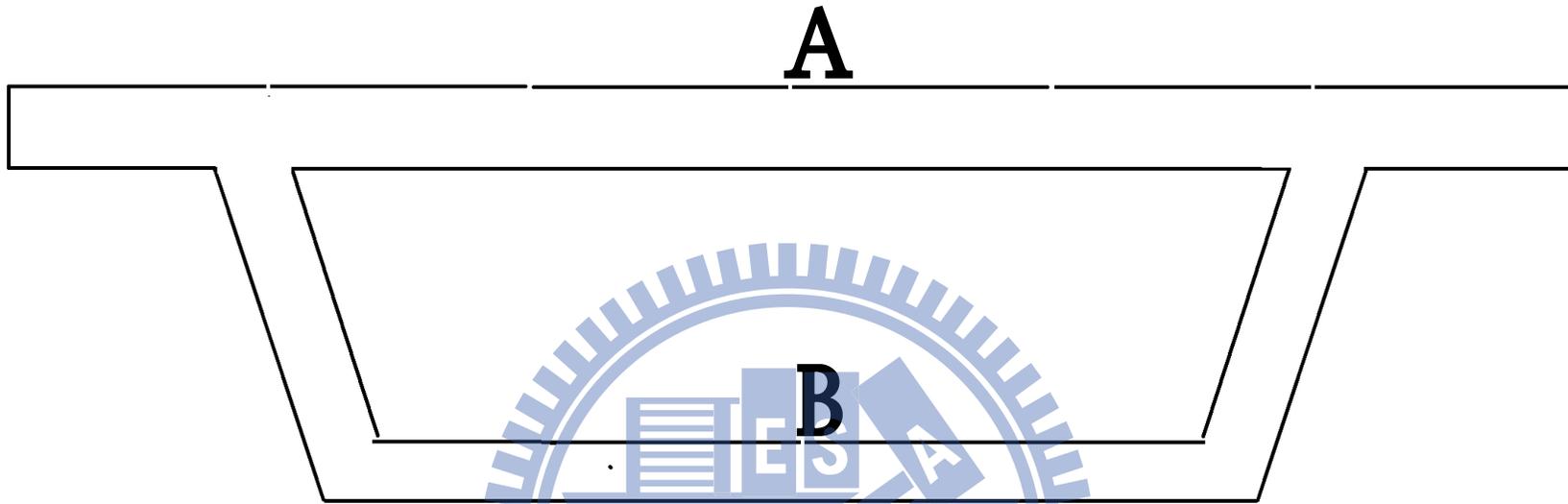


圖 3-9 模型三：側視圖-1

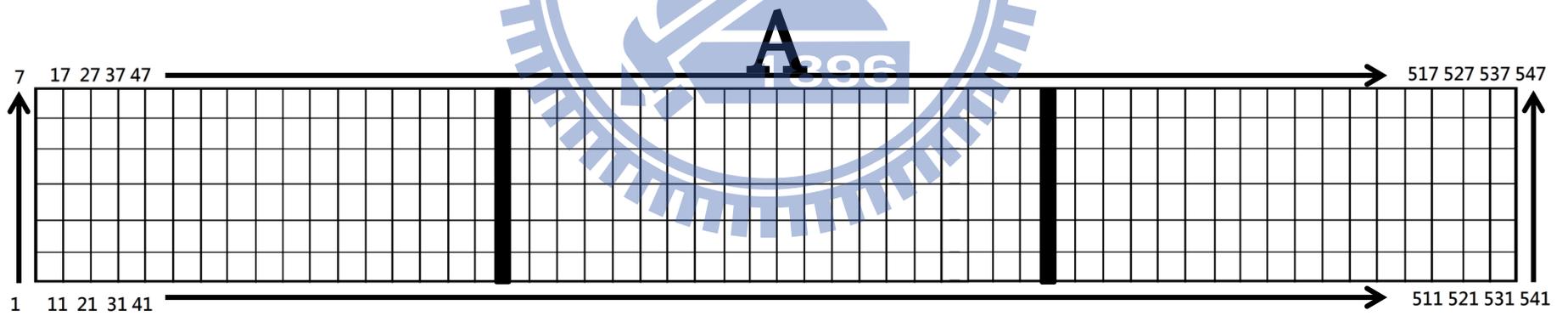


圖 3-10 模型三：俯視圖（橋面）

B

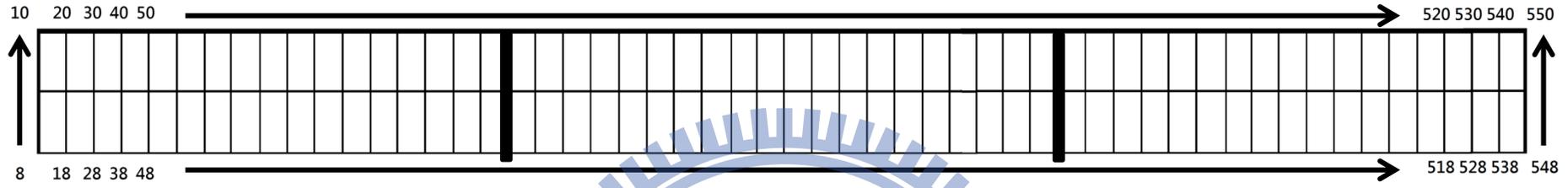


圖 3-11 模型三：仰視圖（箱型底）

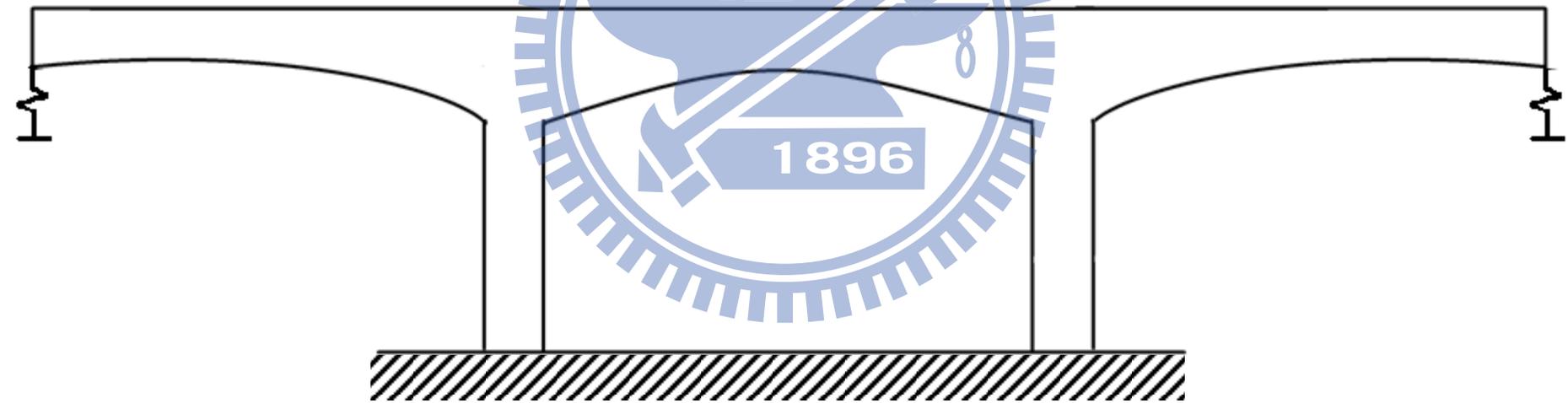


圖 3-12 模型三：側視圖-2

圖 3-3 ~圖 3-6 之參數：

長：150 m

感測器數：30 個

寬：8.4 m、5.4 m、4.2 m (從橋面板由上至下)

彈性模數 (E): 24.85 G Pa

箱型高：1.6 m

剪力模數 (G): 10.35 G Pa

節點數：550

計算次數：900000

柱高：10 m

AB 圖中較粗的地方為柱



8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96	104	112	120	128	136	144	152	160	168	176	184	192	200	208	216	224	232	240	248
7	15	23	31	39	47	55	63	71	79	87	95	103	111	119	127	135	143	151	159	167	175	183	191	199	207	215	223	231	239	247
6	14	22	30	38	46	54	62	70	78	86	94	102	110	118	126	134	142	150	158	166	174	182	190	198	206	214	222	230	238	246
5	13	21	29	37	45	53	61	69	77	85	93	101	109	117	125	133	141	149	157	165	173	181	189	197	205	213	221	229	237	245
4	12	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92	100	108	116	124	132	140	148	156	164	172	180	188	196	204	212	220	228	236	244
3	11	19	27	35	43	51	59	67	75	83	91	99	107	115	123	131	139	147	155	163	171	179	187	195	203	211	219	227	235	243
2	10	18	26	34	42	50	58	66	74	82	90	98	106	114	122	130	138	146	154	162	170	178	186	194	202	210	218	226	234	242
1	9	17	25	33	41	49	57	65	73	81	89	97	105	113	121	129	137	145	153	161	169	177	185	193	201	209	217	225	233	241

圖 3-13 模型四限制感測器放置位置之橋面板

長：15 m(每塊長 0.5 m)

1 彈性模數(E)：24.86 × 10⁶ KN/m²

寬：3.5 m(每塊寬 0.5 m)

剪力模數(G)：10.35 × 10⁶ KN/m²

厚：0.25 m

節點數：248

感測器數：30 個

計算次數：900000

不能放置感測器位置之節點編號：95 96 103 104 145 146 151 152 153 154 159 160

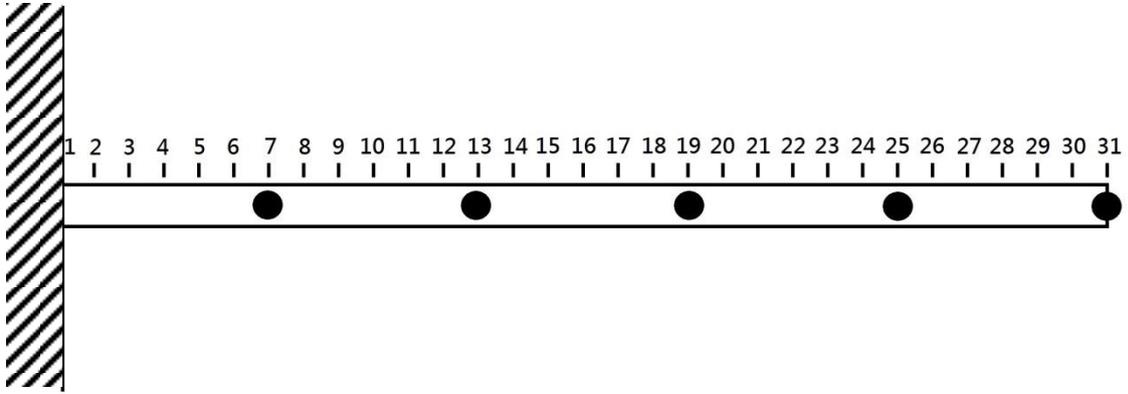


圖 4-1 模型一之感測器配置位置

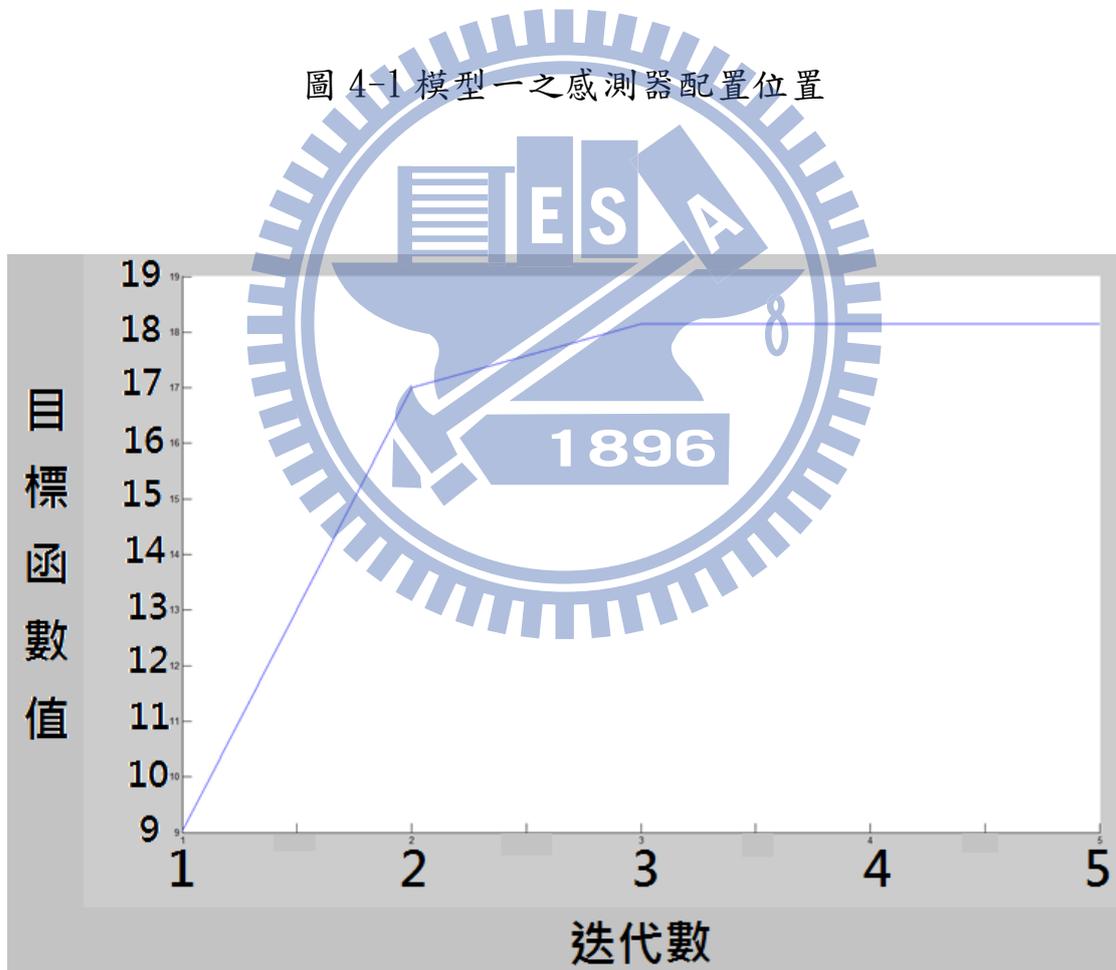


圖 4-2 搜尋模型一時之目標函數與迭代次數關係圖

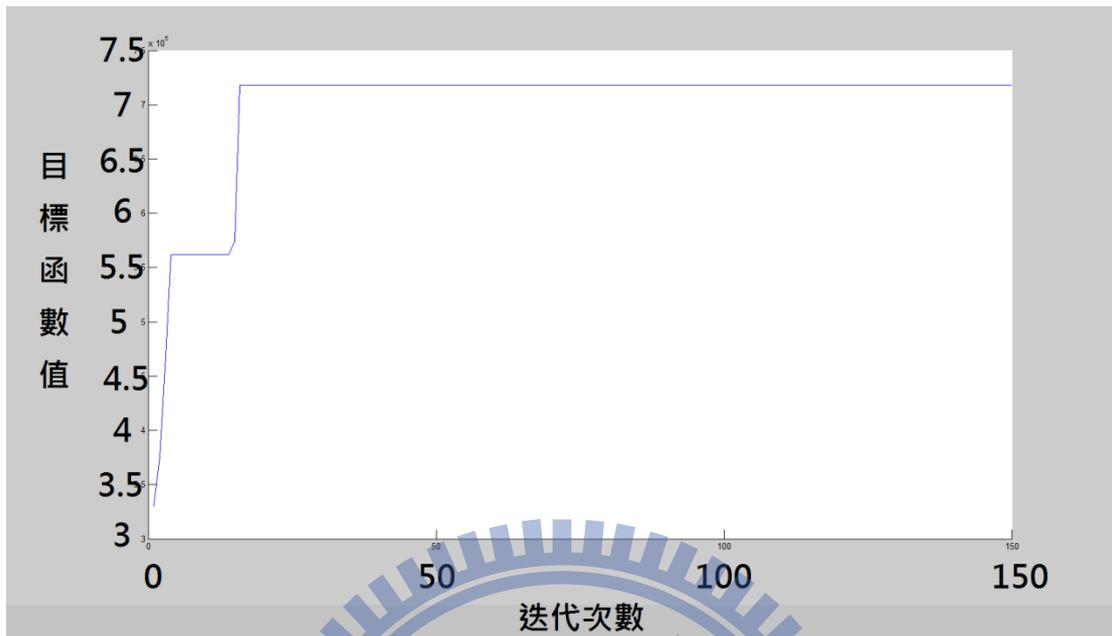


圖 4-3 增加計算次數分析模型二之目標函數與迭代次數關係圖

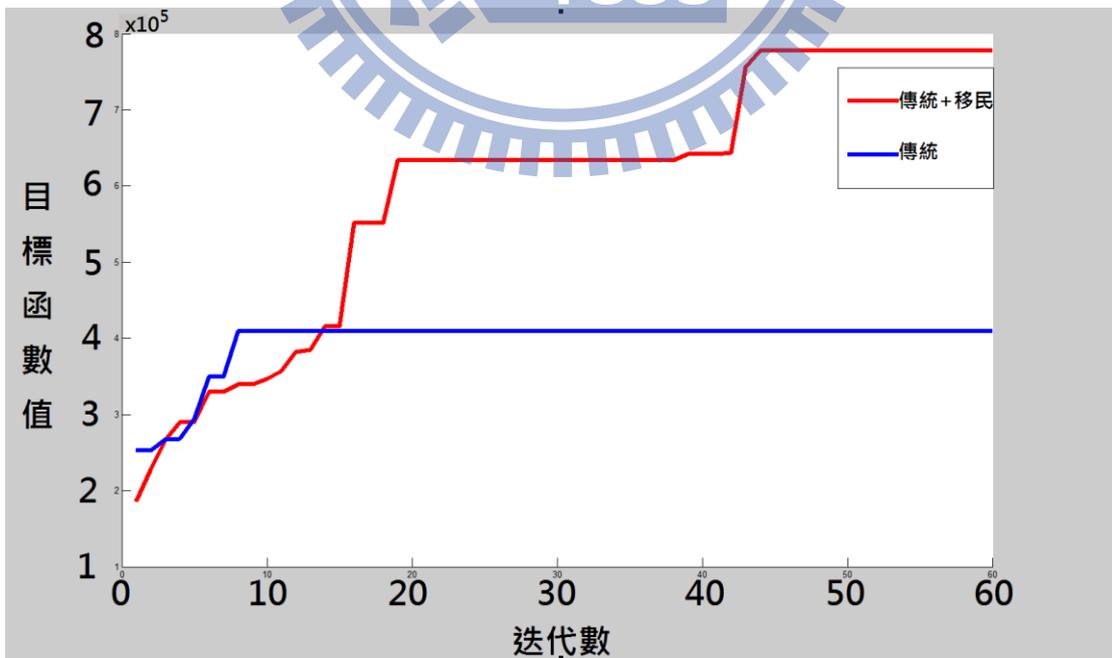


圖 4-4 加入移民策略之目標函數與迭代次數關係圖

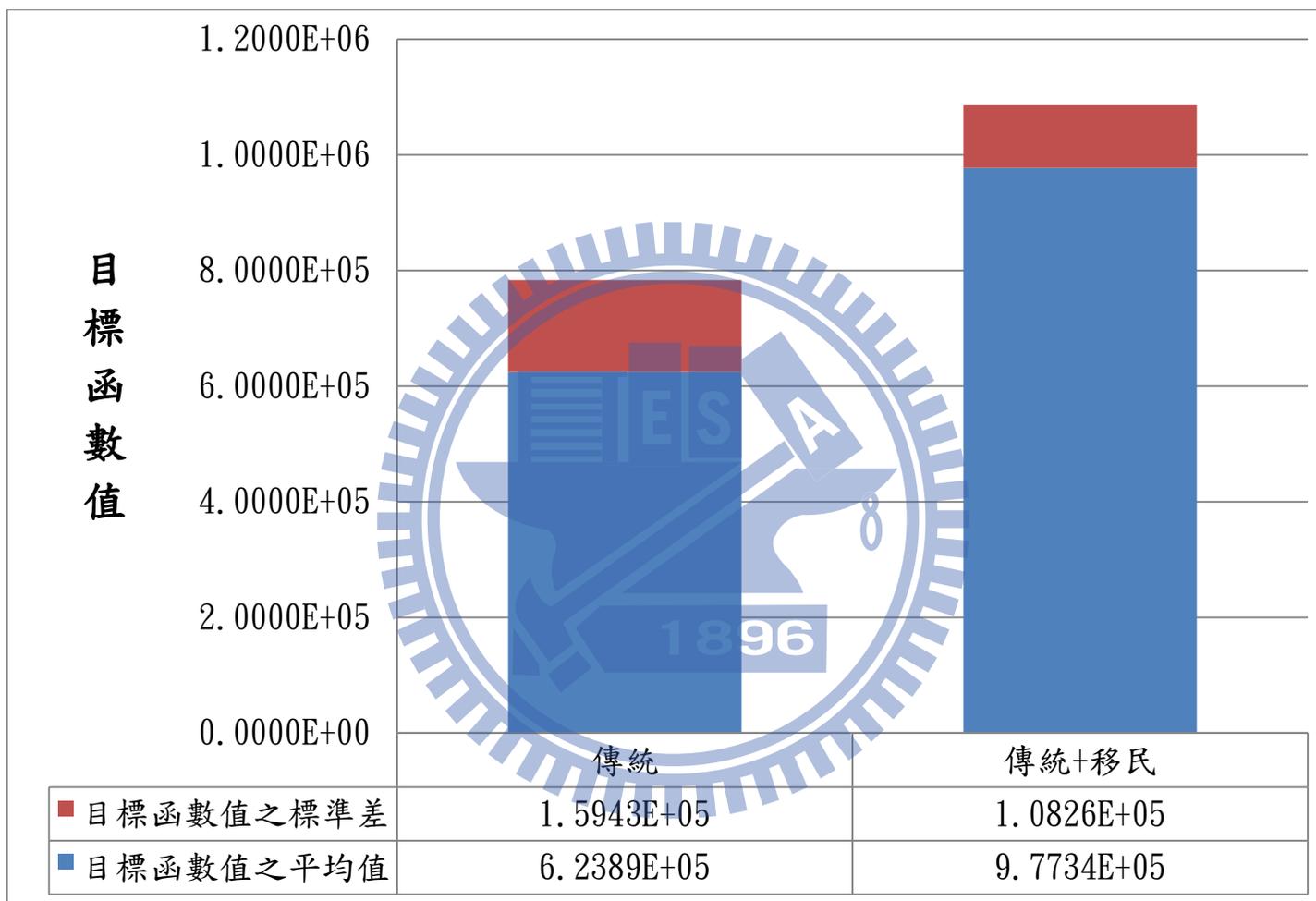


圖 4-5 藉分析模型二證明移民策略效益圖

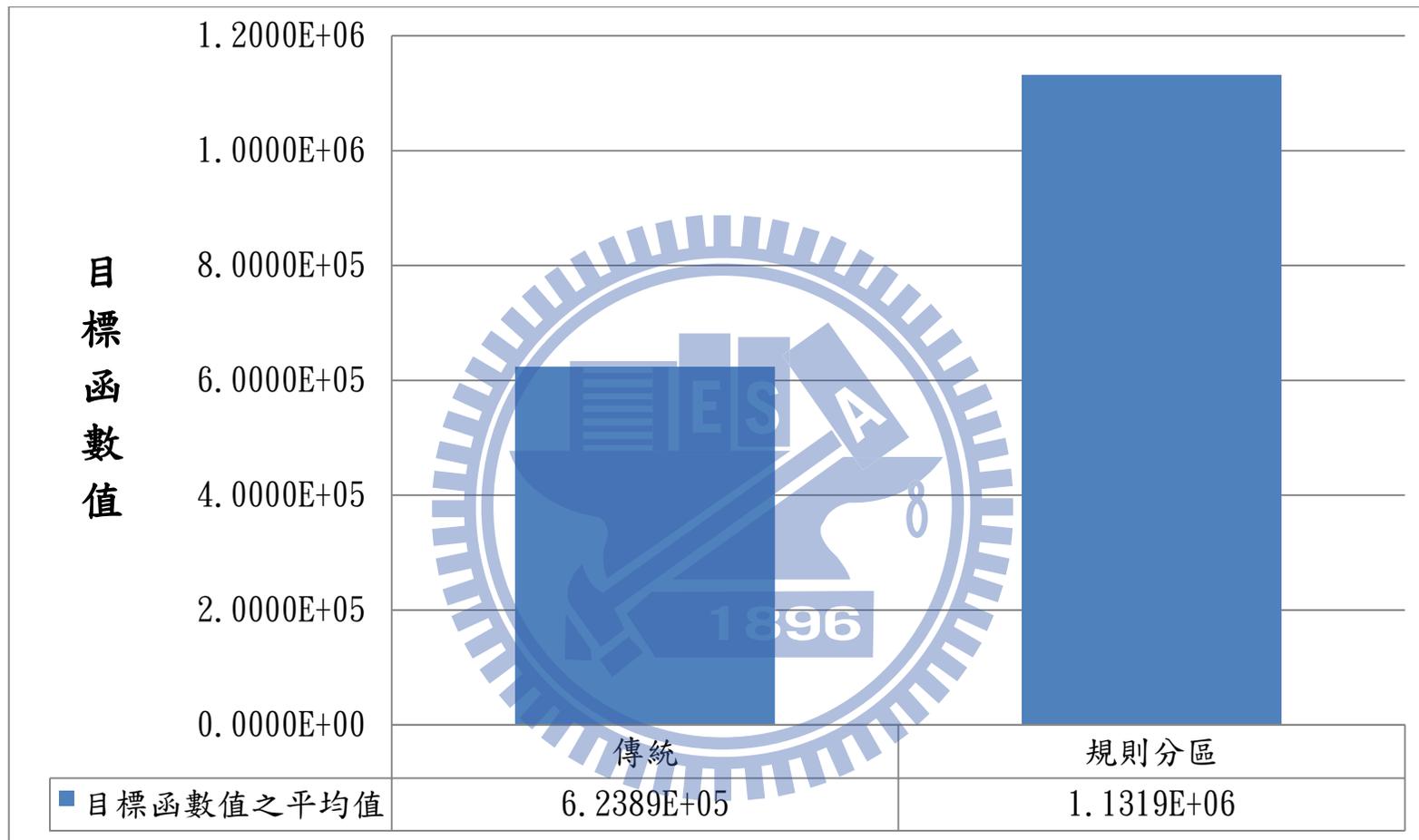


圖 4-6 藉分析模型二證明分區策略效益圖

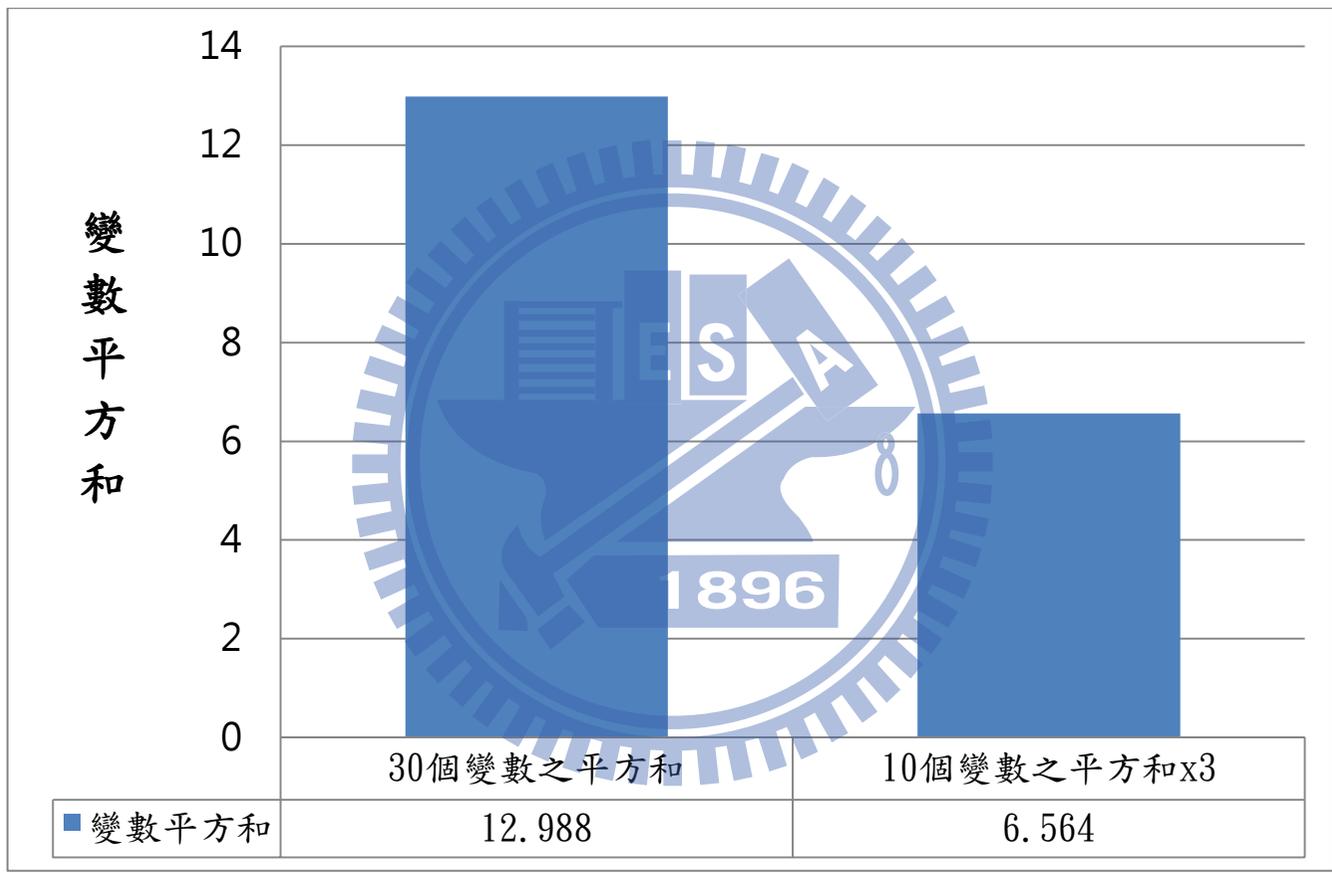


圖 4-7 不同變數執行平方和最小值問題之準確度比較圖

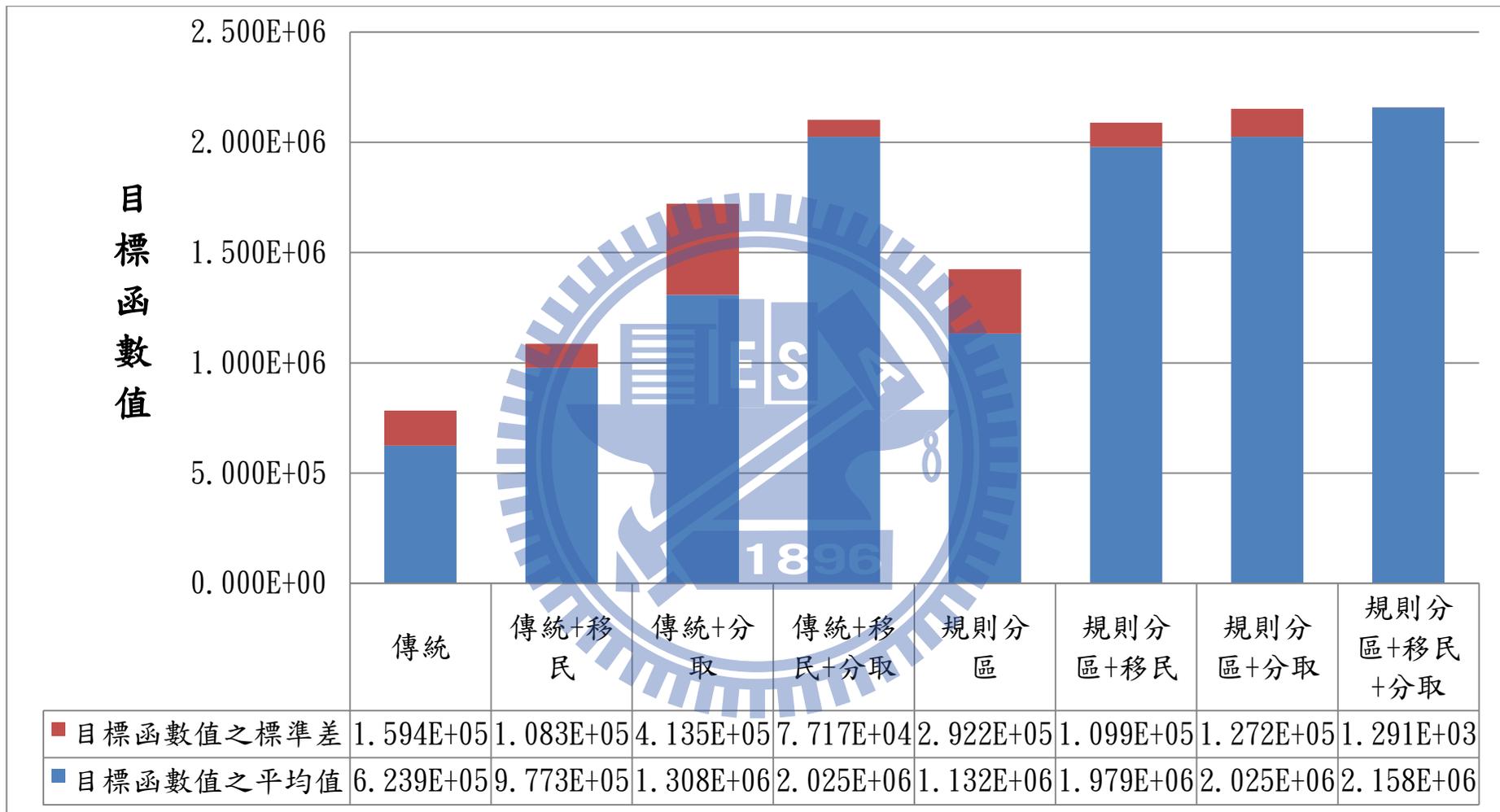


圖 4-8 各種策略組合的目標函數值之平均值與標準差之比較圖

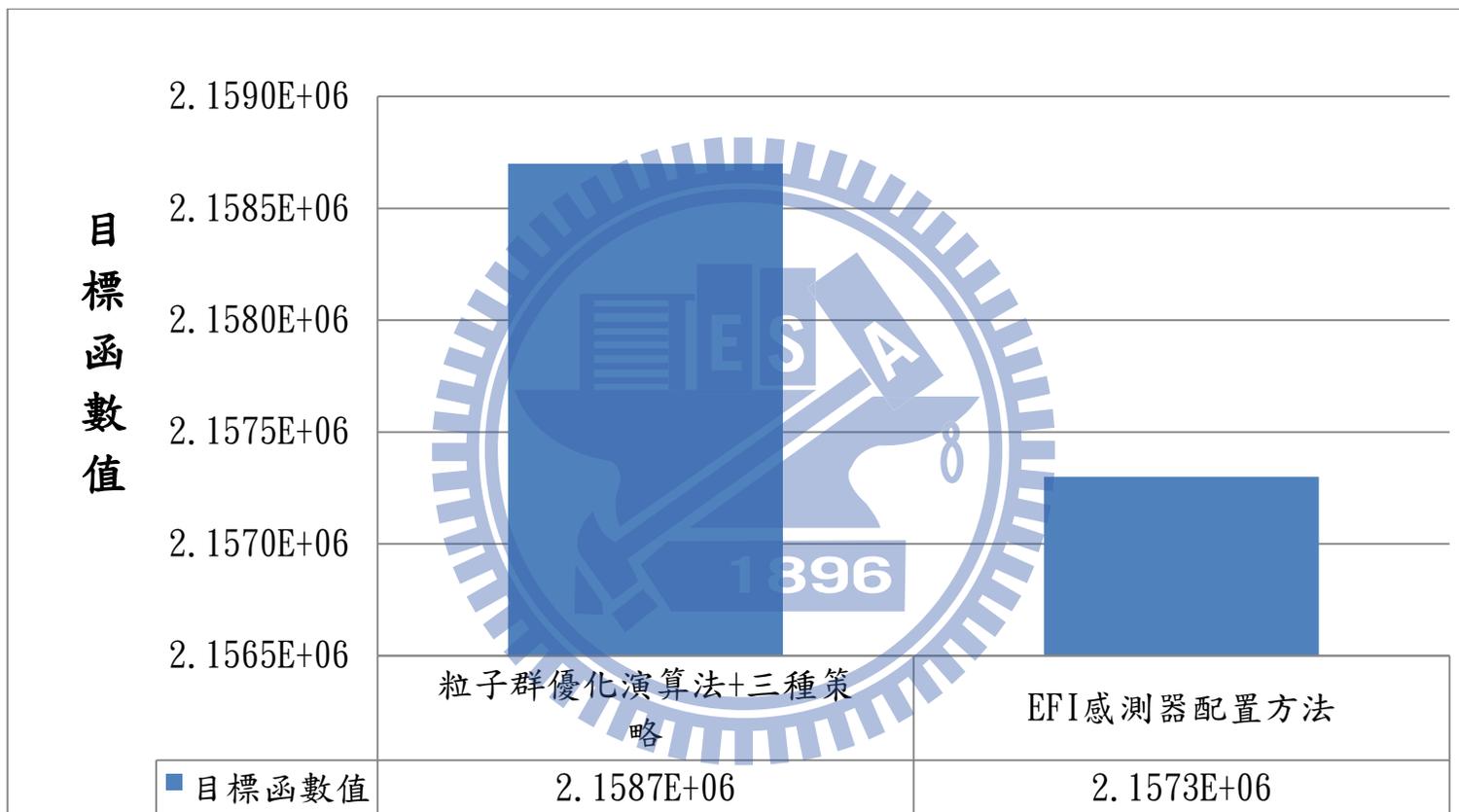


圖 4-9 加入搜尋策略之粒子群優化演算法與 EFI 感測器配置方法之比較

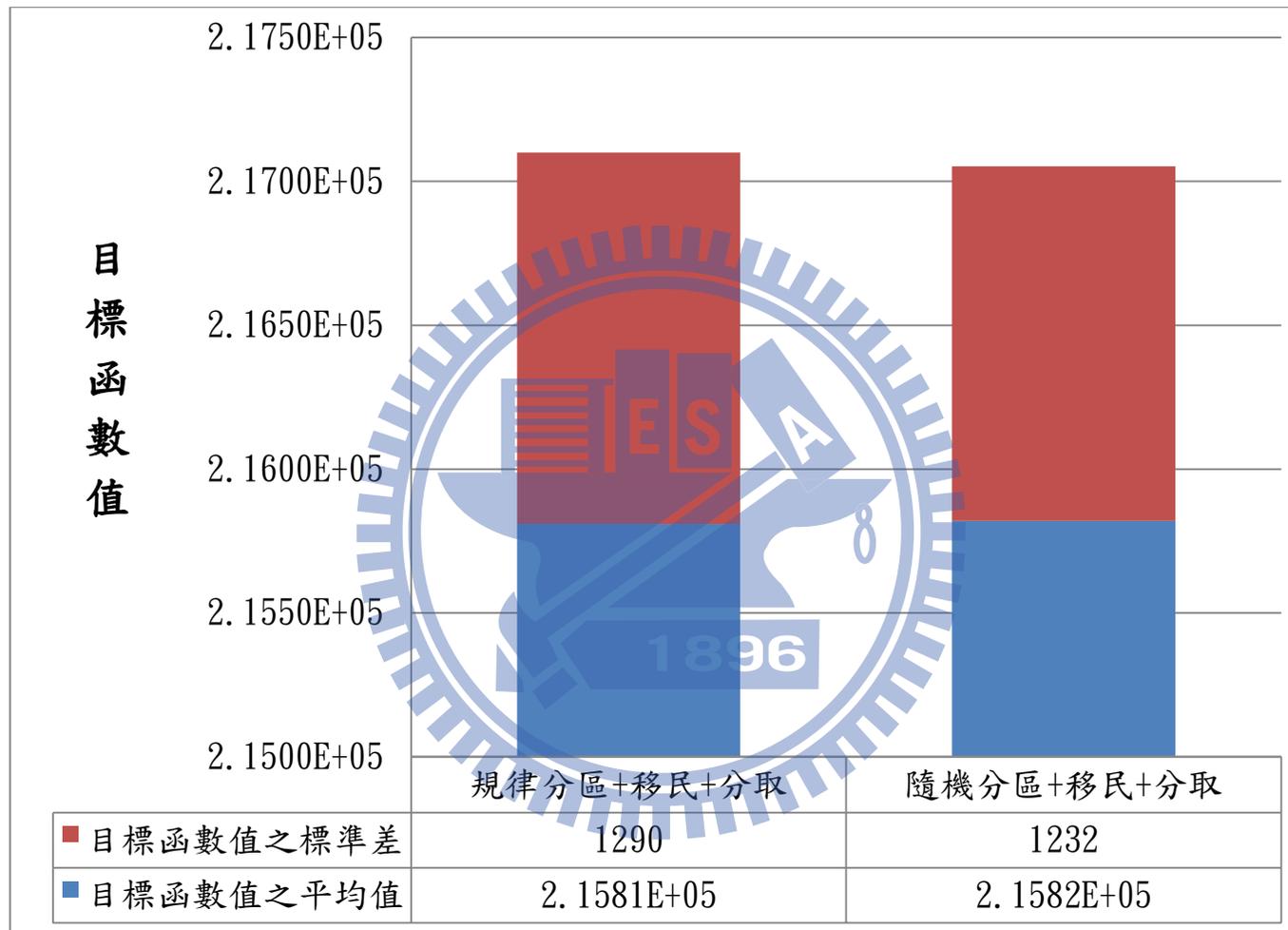


圖 4-10 不同的分區類型分析模型二(橋面板)之比較圖

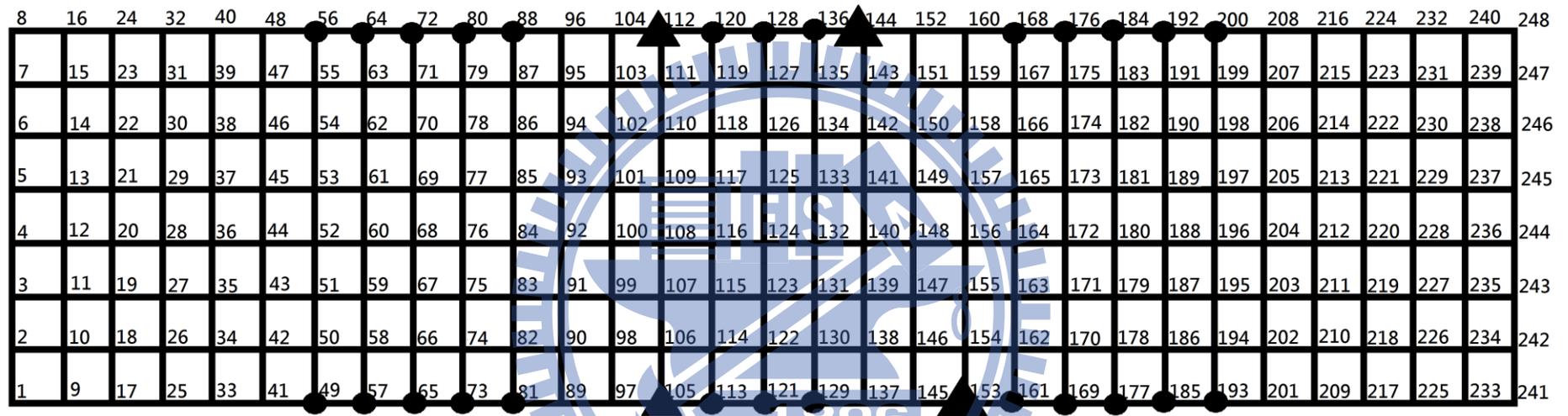


圖 4-11 橋面板之感測器最佳化配置點位之一

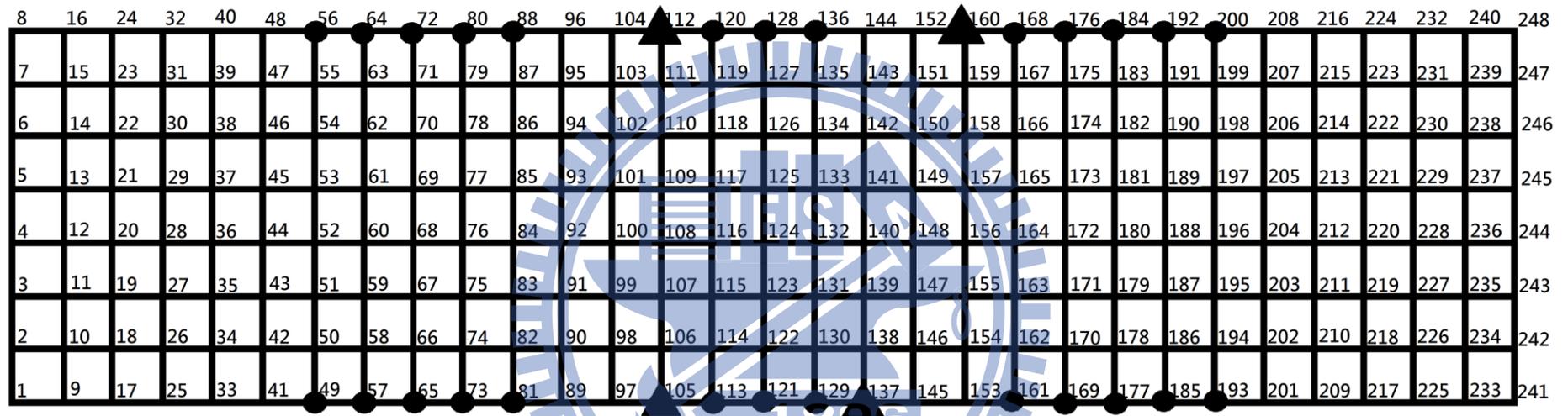


圖 4-12 橋面板之感測器最佳化配置點位之二

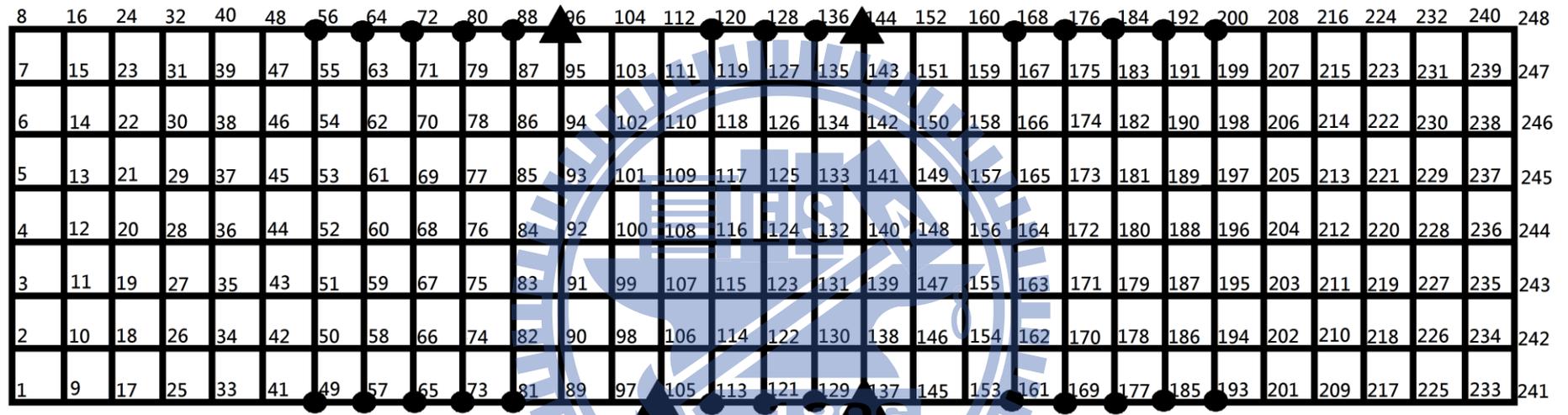


圖 4-13 橋面板之感測器最佳化配置點位之三

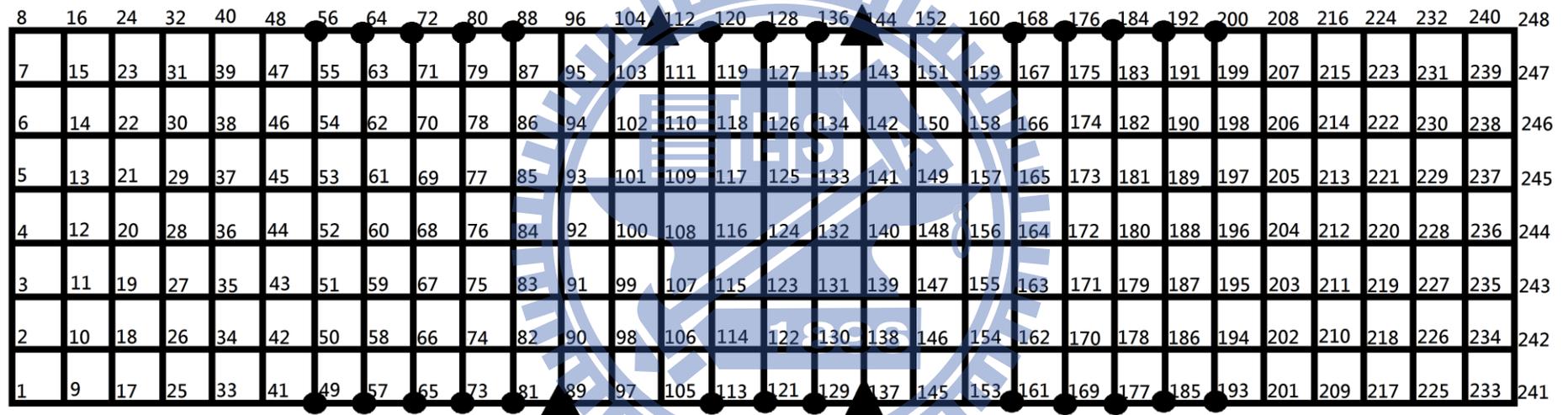


圖 4-14 橋面板之感測器最佳化配置點位之四圖

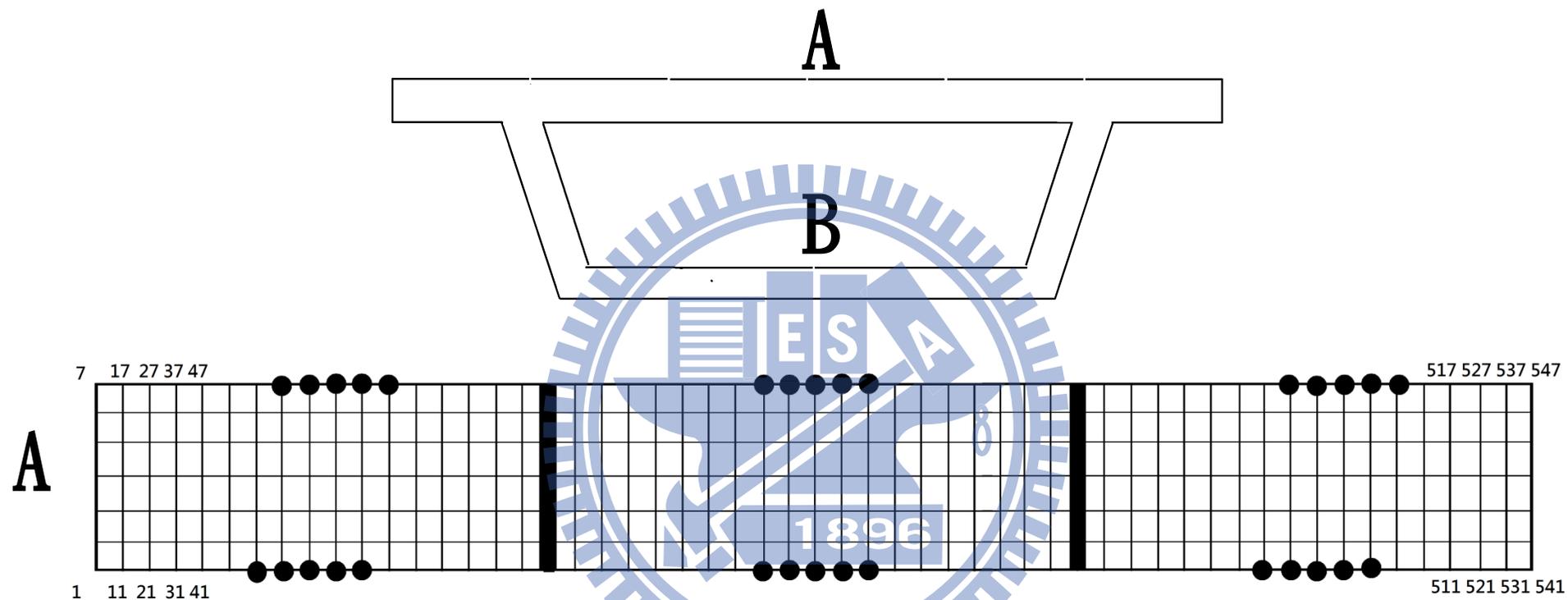


圖 4-15 3D 橋面板之感測器最佳化配置點位之一（上為橋面板，下為箱型底）

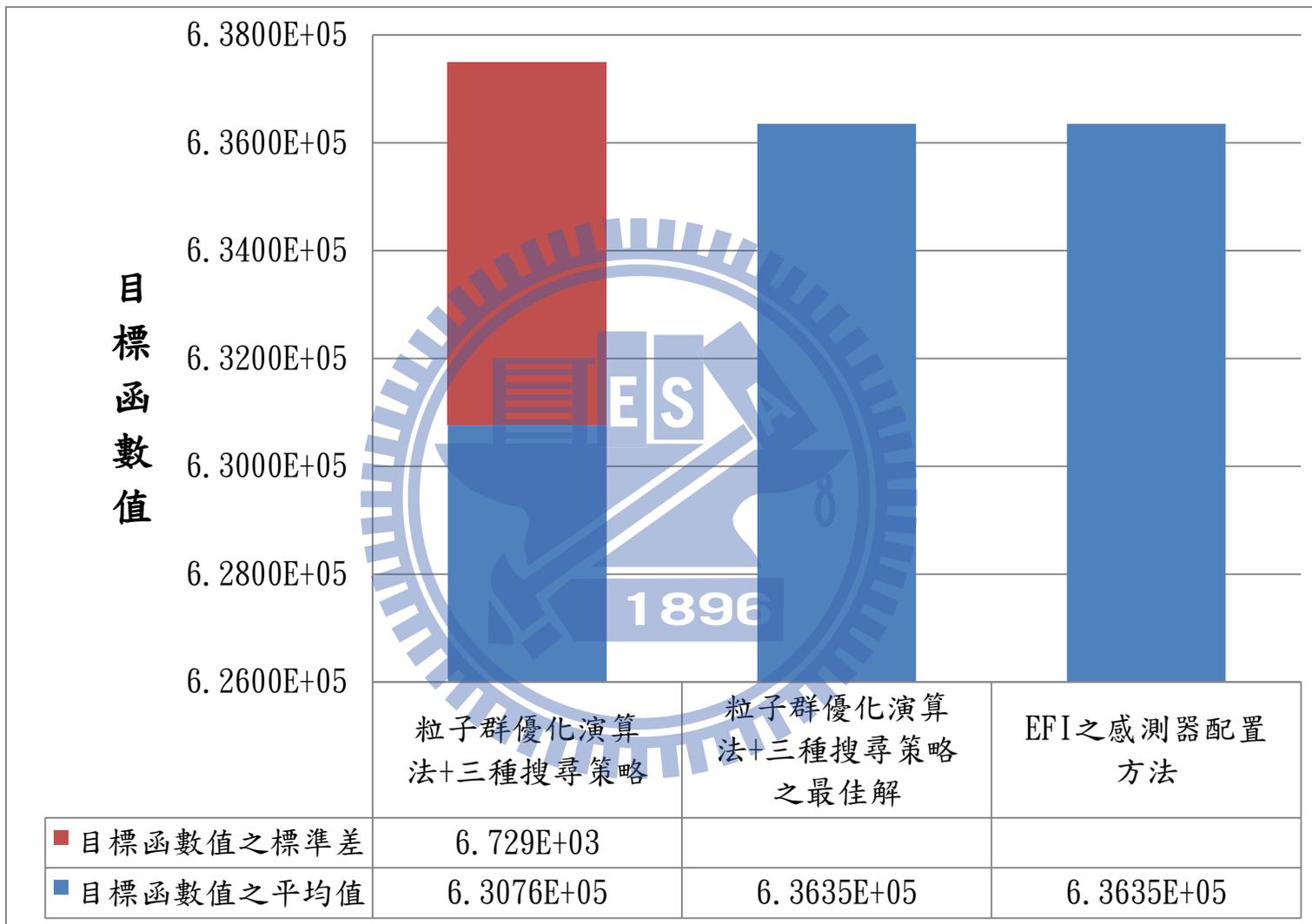


圖 4-16 加入搜尋策略後粒子群優化演算法分析於模型三並與 EFI 感測器配置方法比較（箱型橋面板）

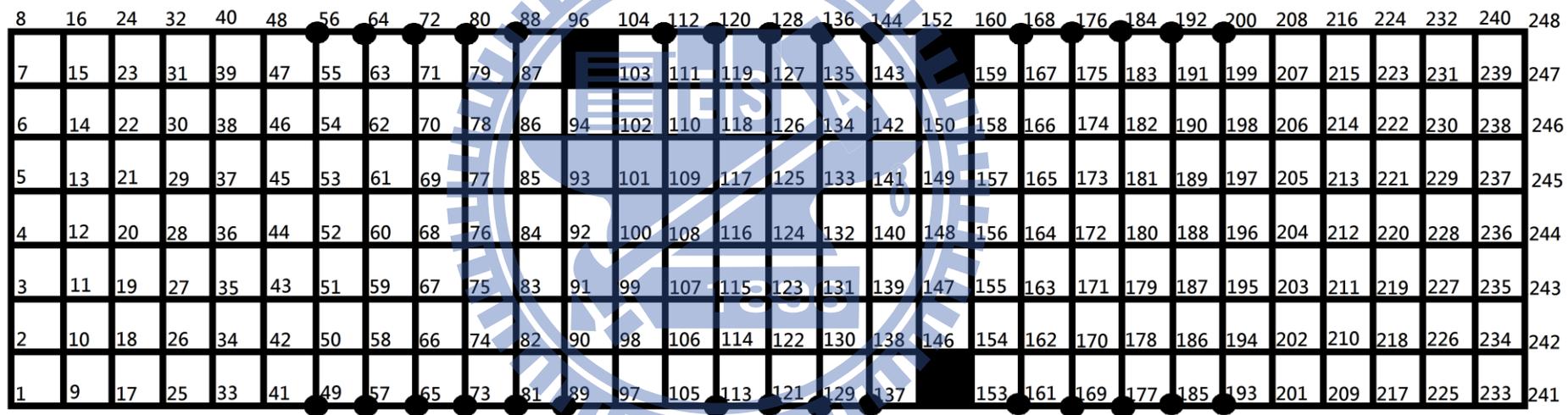


圖 4-17 模型四之感測器配置位置

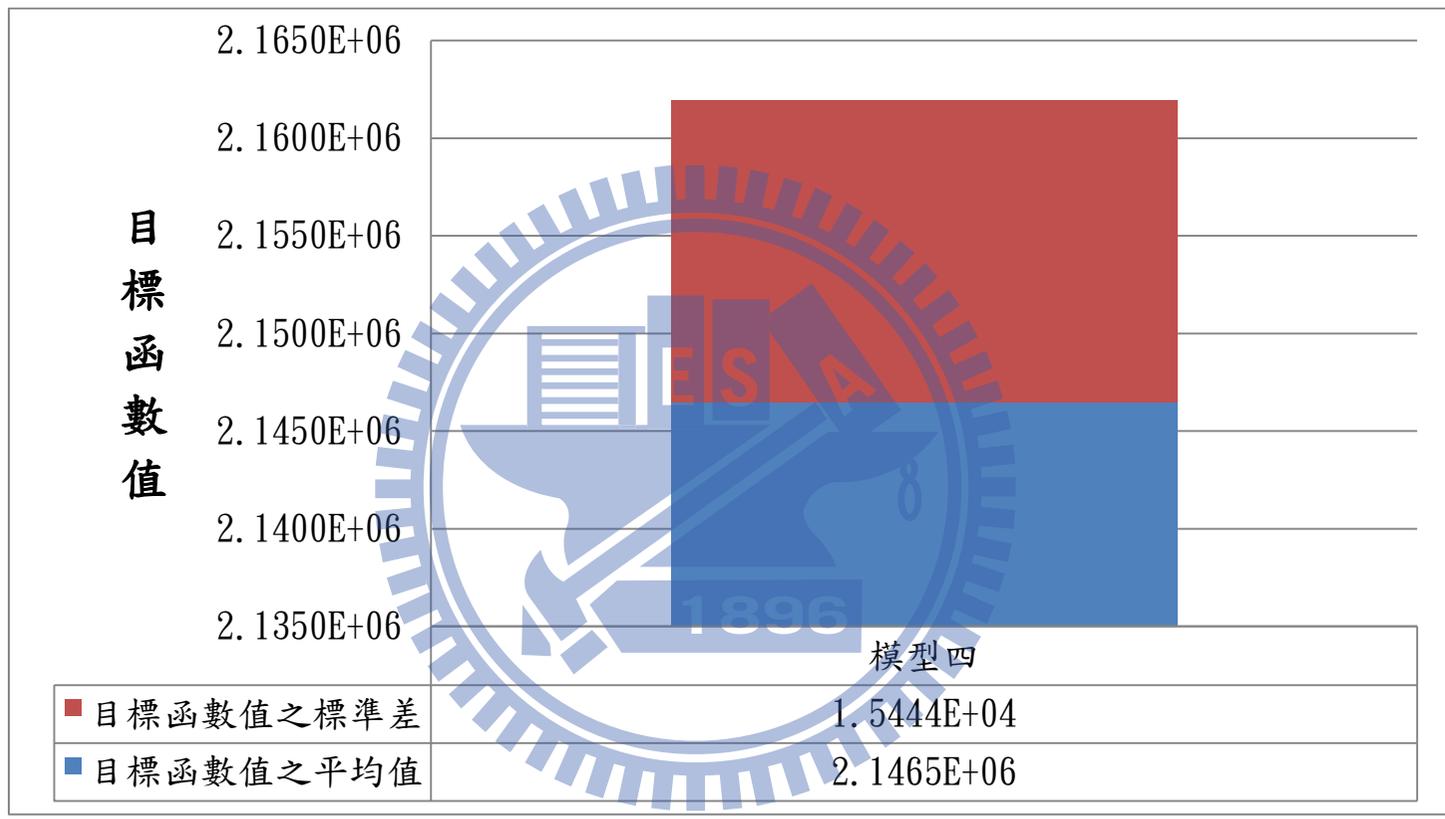


圖 4-18 模型四之目標函數值之平均值與標準差